Spektrum
DER WISSENSCHAFT

FOTOGRAFIE
DIE ZUKUNFT DER DIGITALKAMERAS

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT
8/08
AUGUST 2008

KREBS
Paradoxer Weg zum Zelltod durch bessere Durchblutung

NANOTECHNOLOGIE
Graphen – der Superstoff aus dem Bleistift

KLIMA
Legt die Erderwärmung tatsächlich eine Pause ein?

Der kosmische Zeitpfeil

Läuft die Zeit nur in Richtung Zukunft, weil unser Kosmos Teil eines Multiversums ist?

7,40 € (D/A) · 8,– € (L) · 14,– sFr.
D6179E
08
4 194058 407402

www.spektrum.de

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Klimawette und Winterschlaf

Nur nicht das Erdklima erhitzt sich, auch die Debatte über die steigenden Temperaturen entwickelt derzeit beträchtliche Hitzeschübe. So überraschten kürzlich Klimaforscher aus Hamburg und Kiel (darunter der angesehene Experte Mojib Latif) die Öffentlichkeit mit der Prognose, der globale Temperaturanstieg werde für einige Jahre zumindest gestoppt *(Keenlyside et al., Nature 453, S. 84)*. Genauer: Durchschnittlich werden die kommenden zehn Jahre kühler sein als die vergangenen.

Diese Vorhersage hängt mit der Entdeckung kurzfristiger Klimaschwankungen zusammen. So unterliegen die Oberflächentemperaturen im Nordpazifik einer etwa zehnjährigen Schwankung. Auch der Atlantik zeigt solche – etwas längerfristigen – Oszillationen, die offenbar in das Klima aller umliegenden Kontinente eingreifen.

Die Studie erschien Anfang Mai im reputierlichen Fachblatt »Nature« – und weckte sogleich den Widerspruch des nicht minder renommierten Klimaexperten **Stefan Rahmstorf** vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. Sportlich bot er zusammen mit einigen Kollegen den »Nature«-Autoren über das Internet eine »Klimawette« an *(www.wissenslogs.de/wblogs/blog/ klimalounge)*. Darin setzen sie einen Geldpreis aus für den Fall, dass bis zum Jahr 2010 diese Vorhersagen eintreffen. Falls aber nicht, dann würden sie natürlich die Auszahlung des Preisgeldes erwarten. Diese Wette löste in Online-Kommentaren einen beträchtlichen Sturm aus. Rahmstorf und Kollegen legten nach und lieferten detaillierte Begründungen für ihren Zweifel an den Prognosen von Mojib Latif und Kollegen. Da steht die Sache nun, die »Gegenseite« wollte auf die Wette – zugegeben, ein etwas ungewöhnlicher Weg, die eigene wissenschaftliche Überzeugung zu dokumentieren – nicht eingehen. Unser Autor Sven Titz, selbst promovierter Klimatologe, nimmt den Disput zum Anlass, über den Stand der Wissenschaft hinter der Klimawette zu berichten. Keine Frage: Ob der irdische Treibhauseffekt umgebremst weiterhin zulegt oder pausiert, geht uns alle an (S. 54).

Pferde sollen Winterschlaf halten? Ich gebe zu, dass ich ziemlich überrascht war, als mir unsere tierbegeisterte Redakteurin Adelheid Stahnke das Manuskript von Regina Kuntz zum Lesen gab. Winterschlaf – da dachte ich eher an Murmeltiere, Igel oder Bären. Doch die junge Verhaltensforscherin berichtet in ihrem Beitrag, wie sie im Rahmen ihrer Doktorarbeit in einem großen Gehege bei Wien herausfand, dass die dort lebenden Wildpferde zumindest eine milde Form des Winterschlafs halten. Gut, die Tiere »schlafen« dabei nicht so tief wie Murmeltiere. Aber sie drosseln ihren Stoffwechsel offenbar so stark, dass sie in den winterkalten Steppen der Mongolei bei –40 Grad Celsius überleben können. Auch das hat mich erstaunt: In die Heimat Dschingis Khans werden die einst vom Aussterben bedrohten Tiere nämlich schon seit einigen Jahren wieder erfolgreich ausgewildert und halten die Härten des dortigen Klimas problemlos aus (S. 46).

MIT FRDL. GEN. VON REGINA KUNTZ

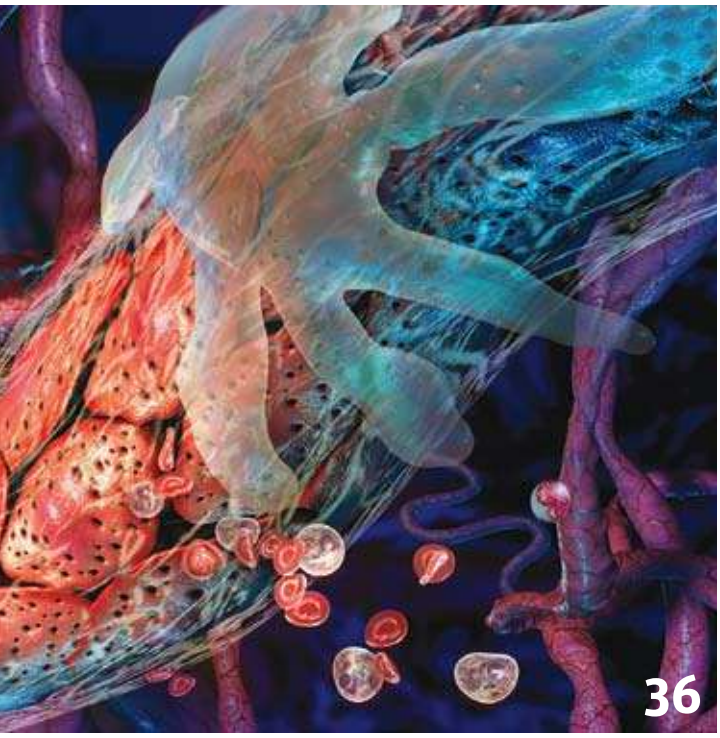
Verhaltensforscherin Regina Kuntz mit einem Prschewalski-Pferd im Nationalpark Neusiedler See

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

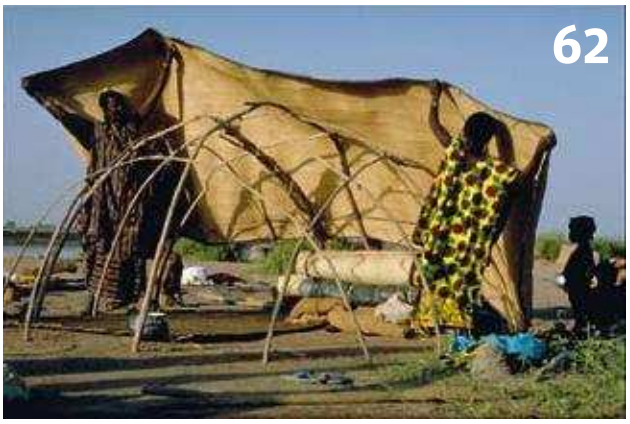
INHALT

AUGUST 2008



MEDIZIN & BIOLOGIE
Bessere Durchblutung macht Tumoren verwundbar

ERDE & UMWELT
Lachsschwärme verraten natürliche Klimaschwankungen



MENSCH & GEIST
Überraschende archäologische Funde in Mali

AKTUELL

10 Spektrogramm
Gedankenlesen per Computer · Nanofasertuch für Ölteppiche · Blinde Uhr · Nistplatzsuche mit den Ohren u. a.

13 Bild des Monats
Weltraumroboter in Aktion

14 Wie kommt es zu immer neuen Sportrekorden?
Fortschritt oder Zufall – Mathematik macht den Unterschied erkennbar

16 Laserskalpell mit Tiefenwirkung 🔊
Zellen mit Licht abtöten – nun auch im Innern von Geweben

19 Der erste Petaflopsrechner
Mit Playstation-Chips schafft er eine Billiarde Rechenschritte pro Sekunde

21 Leuchtende Lügen 🔊
Zeigt der Blick ins Gehirn, ob jemand die Unwahrheit sagt?

23 Springers Einwürfe
Ehrlich währt am längsten – auch in der Wissenschaft?

ASTRONOMIE & PHYSIK

TITEL

26 Was gibt der Zeit ihre Richtung?
Zu den grundlegenden Tatsachen unseres Lebens gehört, dass die Zukunft anders aussieht als die Vergangenheit. Lässt sich die Asymmetrie der Zeit kosmologisch erklären?

MEDIZIN & BIOLOGIE

36 ▶ Gebändigte Blutgefäße
Wirkstoffe, die das chaotisch gewachsene Blutgefäßnetz in einem Tumor zurechtstutzen, verschaffen Krebsmedikamenten besseren Zugang zum Krankheitsherd

46 Heimlicher Winterschlaf 🔊
Kampf der Kälte: Urwildpferde schränken dazu nicht nur ihre Aktivität ein und drosseln ihren Stoffwechsel, sondern senken überraschenderweise auch ihre Körpertemperatur

Titelmotiv: Kenn Brown, Mondolithic Studios

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel finden Sie auch in einer Audioausgabe dieses Magazins, zu beziehen unter: www.spektrum.de/audio

TITELTHEMA

Kosmischer Ursprung des Zeitpfeils

26

68

MENSCH & GEIST
Lückenlose Raumfüllung

78

TECHNIK & COMPUTER
Digitalfotos der Zukunft

ERDE & UMWELT

54 ▶ **Im Wechselbad des Klimas**
Die Oberflächentemperaturen von Atlantik und Pazifik schwanken im Verlauf von Jahrzehnten. Diese Oszillation könnte vorübergehend sogar die globale Erwärmung aufhalten

MENSCH & GEIST

SERIE ARCHÄOLOGIE IN WESTAFRIKA
62 **Noch Jäger oder schon Bauer?**
Jahrtausendealte Keramik aus Mali irritiert die Forscher: Liegen die Anfänge der Jungsteinzeit nicht im Zweistromland, sondern in Afrika?

68 **Pflasterung des Raums**
Welche geometrischen Körper füllen lückenlos den Raum, wie sind in einem Kristall die Atome angeordnet? Kombinatorische Methoden liefern überraschende Lösungen für alte Rätsel

TECHNIK & COMPUTER

78 ▶ **Grenzenlose Digitalfotografie**
Forscher erproben, wie Fotografen immer mehr Eigenschaften ihrer Bilder noch nachträglich verändern können

WISSENSCHAFT IM ALLTAG
84 **(Fast) Nichts ist unmöglich**
Der Blue Screen verleiht Schauspielern Superkräfte – zumindest im Film

86 ▶ **Wunderstoff aus dem Bleistift**
Eine kürzlich entdeckte Kohlenstoffform verspricht nicht nur interessante praktische Anwendungen, sondern auch aufregende Grundlagenphysik

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN
94 **Mathematik-Kunst-Wettbewerb: die Ergebnisse**
Die schönsten unter mehr als 800 algebraischen Flächen

JUNGE WISSENSCHAFT
98 **Jugend forscht 2008 (II)**
Arbeiten im Bundeswettbewerb zu den Themen Technik und Medizin

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial:
Klimawette und Winterschlaf
8 Leserbriefe
8 Impressum
63 Im Rückblick
100 Rezensionen:
Richard David Precht *Wer bin ich – und wenn ja, wie viele?*
Peter Wellnhofer *Archaeopteryx*
Hans Günter Gassen *Das Gehirn*
Norbert Herschkowitz *Das Gehirn*
Georg Schwedt *Chemie für alle Jahreszeiten*
Hubert Mania *Gauß*
106 Vorschau

ONLINE

Dies alles und vieles mehr finden Sie in diesem Monat auf **www.spektrum.de**. Lesen Sie zusätzliche Artikel, diskutieren Sie mit und stöbern Sie im Heftarchiv!

SIBYLLE FRANZ

SPEKTRUMDIREKT Dossier Meer
www.spektrumdirekt.de/meer

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

INTERAKTIV Spektrum wird bald 30!
www.spektrum.de/jubilaeum

spektrumdirekt.de

Die Wissenschaftszeitung im Internet

Hunger auf Energie

Wie kann der Energiehunger der Menschheit gestillt werden? Fossile Energieträger gelten als Klimakiller, Kernenergie genießt einen schlechten Ruf und alternative Quellen sprudeln bisher nur spärlich. »spektrumdirekt«-Autor Gerhard Samulat gibt einen aktuellen Überblick:
www.spektrumdirekt.de/energie

Meere

Aus dem Meer kommt alles Leben – und noch heute ist es von größter Bedeutung, liefert unter anderem Nahrung und speichert Kohlendioxid. »spektrumdirekt« berichtet über Artenverlust, Anstieg des Meeresspiegels, Tsunamigefahren und vieles mehr
www.spektrumdirekt.de/meer

TIPPS

Nur einen Klick entfernt

Astronomie für Schüler (und Lehrer)

wis – wissenschaft in die schulen!

Wie funktionieren Radiowellen, und wie lässt sich die kosmische Hintergrundstrahlung im eigenen Experiment nachweisen? Zu diesen und weiteren Fragen finden hier Lehrer und Eltern Unterrichtsmaterialien auf Basis aktueller Artikel, die in »Spektrum der Wissenschaft« oder »Sterne und Weltraum« erschienen sind
www.wissenschaft-schulen.de

Weltall kompakt

Täglich neue Nachrichten zur Astronomie finden Sie auch auf der Homepage von Sterne und Weltraum: Ob Supernovae, Schwarze Löcher, Weltraumteleskope oder Raumfahrtmissionen – unsere im Heidelberger Max-Planck-Institut für Astronomie beheimateten Redaktionskollegen informieren darüber
www.astronomie-heute.de/astronews

INTERAKTIV

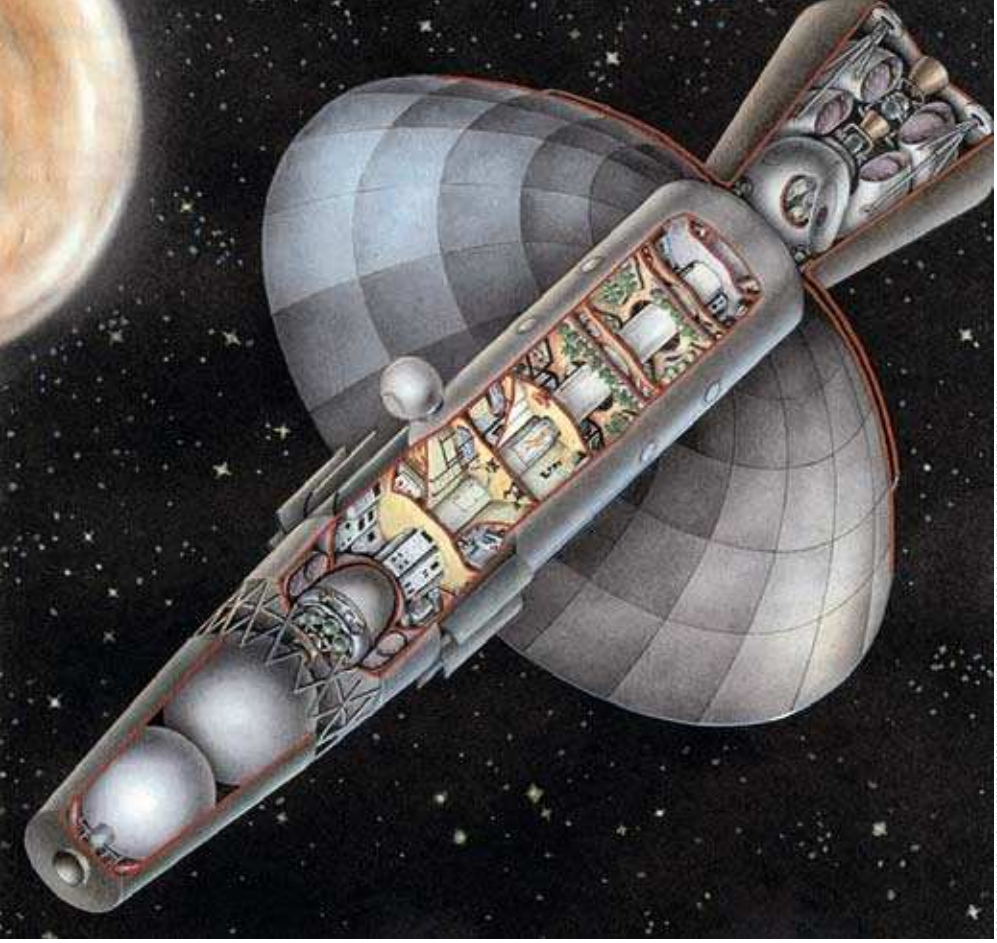
Machen Sie mit!

Besser denken

In jedem steckt ein Genie – zumindest ein bisschen und wenn man seine grauen Zellen auf Vordermann bringt. Wie man das tut, verrät »Besser Denken« von Hartwig Hanser und Co: Denkstrategien für den Kopf. Lesen Sie die Rezension oder schreiben Sie selbst darüber!
www.spektrum.de/artikel/958861

Spektrum wird bald 30!

Auf die Jubiläumsausgabe im November müssen Sie leider noch warten. Hier aber können Sie schon ein wenig schmökern: etwa in rund 90 Artikeln von Nobelpreisträgern oder in der Pressemitteilung zum »Spektrum«-Start, in der Erstausgabe unseres Muttermagazins »Scientific American«. Oder schicken Sie uns Ihre Meinung – zu drei Jahrzehnten »Spektrum der Wissenschaft«!
www.spektrum.de/jubilaeum



ARCHIV KOWALSKI, AUS: WLADIMIR BUGROW, MARSIANSKI PROJEKT S. P. KOROLJOWA, VERLAG RUSSKIJE WITJASI, MOSKAU 2007

FÜR ABONNENTEN »Koroljows geheimes Marsprojekt«

www.spektrum-plus.de

FREIGESCHALTET

»Aufbau Antik«

www.epoc.de/artikel/960595

Alle Publikationen unseres Verlags sind im Handel, im Internet oder direkt über den Verlag erhältlich

www.spektrum.com
service@spektrum.com
Telefon 06221 9126-743

FÜR ABONNENTEN

Ihr monatlicher Plus-Artikel zum Download

»Koroljows geheimes Marsprojekt«

Russland wollte schon 1974 einen Menschen zum Roten Planeten schicken und entwickelte dafür die mächtige Trägerrakete N1. Bislang galt diese als reine Mondrakete, entwickelt in Konkurrenz zur Saturn 5 der USA. Nun muss die Geschichte der bemannten sowjetischen Raumfahrt in Teilen umgeschrieben werden

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN FREI ZUGÄNGLICH UNTER

www.spektrum-plus.de

FREIGESCHALTET

*Ausgewählte Artikel aus **epoc** und **Sterne und Weltraum** kostenlos online lesen*

»Aufbau Antik«

Im Jahr 227 v. Chr. legte ein verheerendes Erdbeben die griechische Stadt Rhodos in Trümmer, darunter den berühmten Koloss, eines der sieben Weltwunder. Doch wie niemand sonst verstanden es die Rhodier, selbst aus einer Katastrophe noch Profit zu schlagen

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **EPOC** UNTER

www.epoc.de/artikel/960595

»Jagd nach den Vorläufern der Supernovae Ia«

Sie sind eine wesentliche Stütze für die kosmische Entfernungsskala – dabei ist noch nicht einmal gesichert, welche Sterne hier in einer gigantischen Explosion vergehen. Das Röntgenteleskop Chandra bietet nun die Möglichkeit, das Rätsel zu lösen

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **STERNE UND WELTRAUM** UNTER

www.astronomie-heute.de/artikel/960103

WISSENSlogs

Die Wissenschaftsblogs

Netztagebücher von Fußball bis Reproduktionserfolg

Neu hinzugekommen bei den Wissenslogs ist die Biologin Sandra Thal, die sich derzeit mit dem Zusammenhang zwischen Kaffee und Zigaretten beschäftigt (www.wissenslogs.de/wblogs/blog/amuse-gueule). Auch für die Nichtraucher- und Teetrinkerfraktion geeignet ist die Frage von Joachim Schulz, welchen Einfluss die Gesellschaft auf Geschlechterrollen bei Kindern hat, und weshalb die Ergebnisse ausgerechnet im »Journal of Animal Behavior« publiziert werden (www.wissenslogs.de/wblogs/blog/der-quantenmechaniker). Außerdem wird die allerneueste Quelle für Biodiesel vorgestellt (www.wissenslogs.de/wblogs/blog/abgefischt). Diskutieren Sie mit – über diese Themen und viele mehr!

www.wissenslogs.de
www.scilogs.de

Ewig währendes Glück

Macht Geld glücklich? Mai 2008

Eine Problematik des Glücklichseins hat Augustinus aufgezeigt: Glück ist nach ihm, dass man ein Leben führen kann, das man liebt und will. Nun gehört dazu, dass man das Leben liebt, unbedingt der Wille, dass dieses Leben, so wie man es liebt, von Dauer ist. Daraus folgt dann, dass es im Endlichen kein Glücklichsein gibt: »Fieri non potest, ut eam [scil. vitam], qui sic amat, non aeternam velit. Tunc igitur beata erit, quando aeterna erit.« Übersetzt: »Es kann nicht sein, dass der, der es [das Leben] so liebt, nicht will, dass es ewig währt. Erst dann wird es glücklich sein, wenn es ewig sein wird.« (Gottesstaat, XIV, 25).

Kann es überhaupt irdisches Glück geben?

Reiner Vogels, Swisttal

Antwort des Autors Dr. Edgar Dahl:
Ich stimme Augustinus darin zu, dass es kein wahrhaft irdisches Glück geben kann, aber nicht aus theologischen Gründen, sondern aus biologischen. Evolutionstheoretisch sind wir nicht auf dieser Welt, um uns zu amüsieren, sondern um uns zu reproduzieren. Alles, was der Weitergabe unserer Gene zuträglich ist, geht mit Lust einher, und alles, was diesem Zweck abträglich ist, mit Unlust. Das offenkundigste Beispiel hierfür ist der Sex. Damit wir uns reproduzieren, hat Mutter Natur uns das Verlangen in die Wiege gelegt. Wann immer wir es befriedigen können, empfinden wir Lust und sind glücklich; wird unser Verlangen nicht befriedigt, empfinden wir Unlust und sind unglücklich.

Sich erfolgreich fortzupflanzen, erfordert jedoch weit mehr, als nur gelegentlich Sex zu haben, nämlich in aller Regel, einen Partner zu finden, ihn an sich zu binden, mit ihm eine Familie zu gründen und die gemeinsamen Kinder so gut wie möglich zu versorgen. Um vor dieser keineswegs leichten Aufgabe nicht gleich zu kapitulieren, gängelt uns die Natur geschickt mit Hilfe von Gefühlen, die, objektiv betrachtet, alles andere als angenehm sind: Sehnsucht und Begierde, Neid und Ehrgeiz, Eifersucht und Raserei. Insofern wir von diesen Gefühlen fast unser gesamtes Leben lang getrieben werden, kann es wohl schwerlich dauerndes Glück, sondern bestenfalls vorübergehendes Glück geben.

Ich wage zu bezweifeln, dass der, der ein glückliches Leben führt, zwangsläufig wünschen muss, dass es ewig währe. Das einzige Leben, das wir kennen, ist das irdische, und von diesem wünscht sich wahrscheinlich selbst der Glücklichste nicht, dass es von ewiger Dauer sein sollte. Dazu ist es viel zu schmerzlich. Schließlich ist auch der Glücklichste nicht blind für – in Hamlets Worten – »die Pfeil' und Schleudern des wütenden Geschicks«, denen seine Mitmenschen zum Opfer fallen. Ich denke, wir wünschen uns, dass wir dieses Leben hinter uns lassen können, wenn wir seiner überdrüssig sind.

Fluorid im Wasser

Die artesischen Quellen von Dilmun Juni 2008

Auf S. 68 schreibt der Autor, der Grenzwert für Fluorid im Trinkwasser in warmen Ländern liege bei 1,5 Milligramm pro Liter (mg/l). Dieser Wert gilt aber für gemäßigte Klimazonen und muss je nach regionalen Gegebenheiten (zum Beispiel Wasseraufnahme, Temperatur) angepasst werden. Leider liegen der WHO in warmen Ländern, wo zum Teil erhebliche Mengen Fluorid im Wasser vorkommen (bis zu 50 mg/l in Kenia), keine vollständigen Daten vor, so dass es für diese Länder keinen wissenschaftlich abgesicherten Grenzwert gibt *(WHO: Fluoride in drinking water, 2006)*. Sicherheitshalber sollte der Wert für die tägliche Wasserversorgung halbiert werden (0,7 mg/l).

Die Person, deren Skelett auf S. 69 abgebildet ist, hat sicherlich zu Lebzeiten regelmäßig Wasser mit deutlich über 4 mg/l konsumiert.

Neben der Fluoridaufnahme trägt auch mangelhafte Ernährung als erschwerender Faktor zur Entstehung der Knochenschäden bei.

Bemerkenswert ist auch, dass in China nicht das Wasser, sondern Verbrennung fluoridhaltiger Steinkohle (zum Teil in primitiven Feuerstellen) zum Fluoroserisiko beiträgt.

Prof. Peter Bottenberg, Brüssel

Antwort des Autors Heiko Dirks:
Wesentlich für die Knochenschädigung ist natürlich die Menge des vom Körper

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Thilo Körkel (Online Coordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker, Richard Zinken (Online)
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Thomas Brückner, Lars Fischer, Dr. Markus Fischer, Dr. Werner Gans, Dr. Alexa Höhn.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,40/sFr. 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 7,20 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 7,20 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Goethestraße 85, 10623 Berlin, Tel. 030 526821-841, Fax 030 7526821-828; Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwiete 1 / 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Axel Ude-Wagner, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; Stuttgart: Andreas Vester, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49; München: Bernd Picker, Josephspitalstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 29 vom 01. 01. 2008.

Gesamtherstellung: Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2008 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Chairman: Brian Napack, President: Steven Yee, Vice President and Managing Director, International: Dean Sanderson, Vice President: Frances Newburg, Circulation Director: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel

NATIONALMUSEUM BAHRAIN

Bei diesem Skelettfund aus der frühen Dilmun-Zeit sind die Wirbelknochen zusammengewachsen. Die Ursache dafür dürfte in der hohen Fluoridkonzentration im Grundwasser liegen.

aufgenommenen Fluorids. Den Konzentrationsgrenzwerten für Trinkwasser liegt daher immer ein angenommener Durchschnittsverbrauch an Wasser zu Grunde. Je wärmer das Klima, desto höher der Wasserbedarf und desto geringer die empfohlene Maximalkonzentration an Fluorid pro Liter Wasser. Auch das Körpergewicht spielt eine Rolle, weshalb teilweise für Männer und Frauen unterschiedliche Grenzwerte angegeben werden. Die Knochenverwachsungen der Dilmun zeigen, dass skeletale Fluorose nicht nur bei Extremwerten der Fluoridkonzentrationen auftreten (die oben erwähnten 50 mg/l), sondern durchaus auch bei Konzentrationen von nur wenigen mg/l. Die Forderung von Prof. Bottenberg nach einer Halbierung des Grenzwertes für Fluorid im Trinkwasser ist deshalb vernünftig und angebracht. Erwähnt sei hier noch einmal, dass die moderne Trinkwasserversogung Bahrains über die Meerwasserentsalzung erfolgt; dieses Wasser enthält praktisch kein Fluorid.

Lebensbasis auf der Grundlage des Siliziums

Aliens auf der Erde? April 2008

Eine Kernfrage des Themas »anderes Leben« auf der Erde ist sicher die Definition von Leben generell. Wenn wir davon ausgehen, dass Leben alle Bedingungen genau so erfüllen muss, wie sie auch im Aufsatz – sozusagen als kleinster gemeinschaftlicher Nenner – genannt und beschrieben sind (Stoffwechsel und Fortpflanzung), werden wir unter Umständen immer nur das uns bekannte »Leben« wiederfinden.

Ein besonders interessanter Ansatzpunkt, der vor allem auch den Zeitfaktor mit einbezieht, scheint für mich die Lebensbasis auf der Grundlage des (vierwertigen) Siliziums statt des (vierwertigen) Kohlenstoffs zu sein. Im Grunde »wächst« ein Mineral – ob in der Schmelze oder anderem Milieu – auch nur dann, wenn die entsprechende »Nahrung« (Stoffwechsel) zur Verfügung steht. Dem Einwand, dass aber keine Fortpflanzung stattfindet, kann man damit begegnen, dass hier auf einer anderen raumzeitlichen und erdumspannenden Ebene Auf- und Abbau von Mineralen und Gesteinen einen andauernden »Lebenszyklus« bilden: der Silizium- also ein primärer, der Kohlenstoffkreislauf ein sekundärer, auf dem primären aufsetzender Lebenszyklus ist.

Dr. Wolfgang Schneider, Gladbeck

Persien, klassisches Land der Khanate

Wüstenränder, Mai 2008

Ein sehr hübscher Beitrag, der gern hätte länger sein dürfen. Übrigens: Das klassische Land der Bewässerung von Wüstengebieten durch unterirdische Kanäle, so genannte Khanate, ist Persien. Dort entwickelte sich diese kunstvolle Technik vor mehr als 4000 Jahren.

Dr. Ragna Podewski, Burgdorf

Planck und Einstein – Menschen aus verschiedenen Welten

Max Planck und Albert Einstein – Kollegen im Widerstreit, Mai 2008

Planck und Einstein waren und blieben zwei Menschen aus verschiedenen Welten. Ohne Zweifel war Einstein der geniale und kühne Physiker seiner Zeit, aber er war dabei ganz untypisch. Es gab »Einstein und die anderen Physiker«, wie ein Zeitgenosse sagte. Dass er nach Berlin kam und fast 20 Jahre blieb, war in erster Linie Max Planck zu verdanken.

Planck war 1933 Präsident der KWG sowie Sekretär der Preußischen Akademie und schon 75 Jahre alt. Wenn Einstein über ihn schreibt »60 Prozent edel«, so ist das sehr auf seine eigene Person und den Moment bezogen. Der Artikel ist ebenso auf Einstein zentriert und kann schon deshalb Planck nicht gerecht werden. Die Überschrift im Text »Plancks Feigheit vor dem Freund« ist starker Tobak. Wer seiner Zeitgenossen hätte das so gesehen? Einstein war bereits im Ausland, also in Sicherheit. Da waren Lise Meitner (später) und andere in einer schwierigeren Lage. Planck war für die KWG und die Akademie verantwortlich. Gar keine einfache Situation. Hatte er nach den Schicksalsschlägen und in seinem Alter überhaupt noch die Kraft, die jetzt nachträglich von ihm verlangt wird? Sieht man Bilder aus jener Zeit, kommen einem Zweifel.

1979 hat sich sogar ein Bundespräsident als Planck-Kritiker hervorgetan. Die Antwort darauf vom Physiker Albert Unsöld wurde schließlich doch noch – ein Jahr später – in derselben Zeitschrift gedruckt. Es lohnt sich, sie heute, gerade nach diesem Artikel, noch einmal zu lesen: Physikalische Blätter 36(1980), S. 337–339.

Dr. Fred-Jürgen Breit, Zwingenberg

Erratum:
Der neue Stammbaum der Katzen
Juni 2008

In Südamerika lebten sehr wohl höhere Säugetiere, aber keine höheren – plazentalen – Raubsäugetiere, somit keine Karnivoren.

Briefe an die Redaktion …

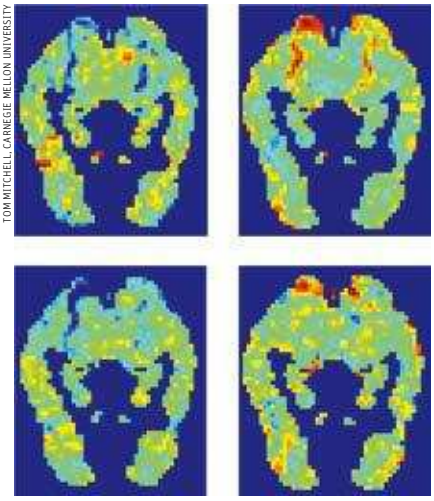
… sind willkommen! Tragen Sie Ihren Leserbrief in das Online-Formular beim jeweiligen Artikel ein (klicken Sie unter www.spektrum.de auf »Aktuelles Heft« beziehungsweise »Heftarchiv« und dann auf den Artikel).

Oder schreiben Sie mit kompletter Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Frau Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg (Deutschland)
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

HIRNFORSCHUNG

Gedankenlesen per Computer



TOM MITCHELL, CARNEGIE MELLON UNIVERSITY

Simulation und Wirklichkeit: Vergleich der vorhergesagten (oben) und gemessenen Hirnaktivität (unten) für die Worte »Sellerie« (links) und »Flugzeug« (rechts)

■ Jedes Wort, das Ihnen einfällt, erzeugt in Ihrem Gehirn ein spezielles Aktivitätsmuster, in dem es gleichsam verschlüsselt ist. Wer dieses Muster dekodieren könnte, wüsste, was Sie denken. Ein Team um Tom Mitchell von der Carnegie Mellon University in Pittsburgh (Pennsylvania) ist diesem Gedankenlesen bei einem eingeschränkten Satz von Wörtern jetzt schon ziemlich nahegekommen.

Die Wissenschaftler vermuteten einen Zusammenhang zwischen der Bedeutung eines Begriffs und seinem Aktivitätsmuster im Gehirn. Dieses Muster sollte demnach zum Beispiel bei allen Ausdrücken, die wir gewöhnlich mit dem Verb »essen« verbinden, Ähnlichkeiten aufweisen.

Folglich bestimmten die Forscher die statistische Korrelation zwischen 60 Substantiven und 25 Verben, die grundlegende sensorische und motorische Funktionen bezeichnen. Dann ließen sie ein Computerprogramm diesen Datensatz mit Magnetresonanzaufnahmen vergleichen, die an Probanden aufgenommen worden waren. Dabei lernte das Rechnermodell, die Aktivierung von Hirnregionen mit Korrelationen zu einzelnen Verben in Verbindung zu bringen. Auf diese Weise konnte es schließlich auch bei unbekannten Substantiven die zugehörigen Aktivierungsmuster qualitativ korrekt vorhersagen.

Die Ergebnisse bestätigen, dass Wörter im Gehirn tatsächlich in erster Linie nach ihrer Bedeutung kodiert sind und nicht, wie man im ersten Moment denken könnte, nach dem Lautmuster. So sagte das Computerprogramm etwa bei Substantiven, die oft mit dem Verb »schieben« kombiniert werden, korrekterweise eine starke Aktivierung des rechten postzentralen Gyrus vorher, der an der Planung komplexer Bewegungen beteiligt ist.

Science, Bd. 320, S. 1191

UMWELTTECHNIK

Nanofasertuch für Ölteppiche

■ Öl und ähnliche organische Flüssigkeiten verschmutzen in immer größerem Maße Ozeane und andere Gewässer und sind nur mit hohem Aufwand wieder zu entfernen. Forscher vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge haben jetzt ein Material entwickelt, das eine einfache, kostengünstige Reinigung erlaubt. Es handelt sich um eine poröse, papierartige Matte aus Nanofasern des Manganoxidminerals Kryptomelan.

Zur Herstellung erhitzten Francesco Stellacci und seine Kollegen einfach eine wässrige Lösung der Ausgangsverbindungen – Salze von Mangan und Kalium – im Autoklaven auf 250 Grad Celsius. Aus der entstehenden Fasersuspension schöpften sie die Matte dann wie ein Blatt Papier. Zum Schluss beschichteten sie die Oberfläche mit Silikon.

Das Ergebnis war ein hochgradig hydrophobes Material. Während es Wasser strikt abweist, benetzen ölige Flüssigkeiten seine Oberfläche und werden durch den Kapillareffekt in die feinen Poren zwischen den Nanofasern hineingezogen. Bis zum 20-Fachen des eigenen Gewichts kann die Matte an solchen Flüssigkeiten aufnehmen. Wasser dagegen dringt auch nach Monaten nicht in die Faserstruktur ein.

Da das Mineral sehr stabil ist, lässt sich das aufgesaugte Öl durch Erhitzen verdampfen und zurückgewinnen. Die Matte selbst ist danach wieder einsatzbereit. Wegen des sehr einfachen Herstellungsprozesses dürfte einer großtechnischen Massenproduktion nichts im Weg stehen.

Nature Nanotechnology, Bd. 3, S. 332

Ein Streifen des Nanofasertuchs saugt einen blau eingefärbten Ölfleck, der auf dem Wasser in der Petrischale schwimmt, bei Berührung auf.

FRANCESCO STELLACI, MIT

ANPASSUNG

Meister im Genklau

■ Die Bdelloidea, eine Untergruppe der Rädertierchen, sind bekannt dafür, dass sie ganz ohne Männer auskommen: Alle Spezies dieser Ordnung pflanzen sich per Jungfernzeugung fort. Das sollte allerdings die Anpassungsfähigkeit einschränken und zur allmählichen Degeneration durch Anhäufung schädlicher Mutationen im Erbgut führen. Wie sich nun zeigte, haben die nur wenige Millimeter langen Wassertiere jedoch eine Möglichkeit gefunden, ihr Genom auch ohne Sex aufzufrischen.

Als eine Forschergruppe um Eugene A. Gladyshev von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) die Verteilung transponierbarer Elemente im Erbgut des Rädertierchens *Adineta vaga* untersuchte, stieß sie auf zahlreiche Gene, die offenbar von Pflanzen, Tieren, Pilzen und Bakterien stammen. Einige davon wurden wohl schon vor sehr langer Zeit vereinnahmt, weil sie inzwischen typische Merkmale ihrer neuen Besitzer aufweisen, andere dagegen sind den ursprünglichen Formen noch sehr ähnlich.

Das übernommene Erbgut befindet sich in den Telomeren: Genabschnitten mit vielen Sequenzwiederholungen am Ende der Chromosomen, die gegenüber Veränderun-

ARCHÄOLOGIE

Altägyptisches Verwaltungszentrum entdeckt

■ Pyramiden, Tempel, Paläste: Das alte Ägypten ist vor allem durch seine Monumentalarchitektur bekannt. Über die Zweck- und Verwaltungsgebäude der urbanen Zentren wissen wir ungleich weniger; denn die meisten Siedlungshügel sind modern überbaut oder durch intensiven Ackerbau zerstört. Eine der seltenen Ausnahmen bildet der Tell Edfu auf halbem Weg zwischen Luxor und Assuan. Hier haben Archäologen jetzt die Überreste eines Verwaltungszentrums freigelegt.

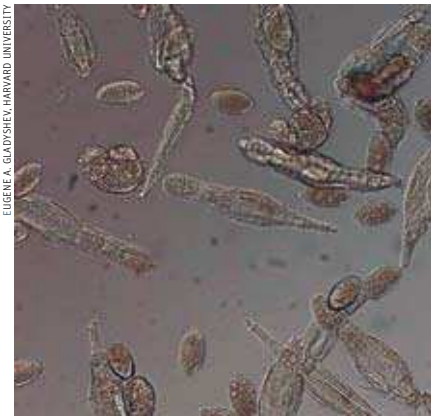
Das Team unter Leitung von Nadine Moeller von der University of Chicago (Illinois) fand die Überreste von sieben großen Kornspeichern aus der 17. Dynastie (1630–1520 v. Chr.) sowie eine nahe gelegene Säulenhalle, deren Ursprünge auf die 13. Dynastie (1773–1650 v. Chr.) zurückgehen. Dort entdeckte Reste von Tonsiegeln und beschrifteten Scherben lassen vermuten, dass es sich um eine Palasthalle handelt, die später zum Verwaltungsgebäude umgewidmet wurde. Dafür spricht auch die Nähe zu den Kornspeichern.

Getreide war im alten Ägypten gebräuchliche Währung und Machtinstrument des Herrschers. Die Silogebäude fungierten mithin nicht nur als Nahrungsspeicher, sondern standen zugleich im Mittelpunkt der örtlichen Administration. Ihr beachtlicher Durchmesser von 5,5 bis 6,5 Metern im Fall von Tell Edfu bezeugt den Wohlstand der einstigen Provinzmetropole. Die Funde sind damit ein erster greifbarer archäologischer Beleg dafür, dass es auch im alten Ägypten Städte gab, die den Reichtum des Niltals verwalteten und für das Staatswesen nutzbar machten.

Pressemitteilung der Universität Chicago

GREGORY MARQUARD, TELL EDFU PROJECT

In dieser zum Verwaltungsgebäude umgewidmeten Säulenhalle führten Beamte Buch über die Zu- und Abgänge bei den benachbarten Kornsilos.



EUGENE A. GLADYSHEV, HARVARD UNIVERSITY

Laborkultur von Rädertierchen der Art *Adineta vaga*

gen weniger empfindlich sind als der Rest des Erbguts. Wie die fremden Gene dorthin gelangt sind, ist noch unklar. Die Forscher vermuten, dass sie eingebaut werden, wenn die Chromosomen während der Trockenstarre der Tiere teilweise zerfallen und sich dann erneut zusammensetzen.

Science, Bd. 320, S. 1210

WAHRNEHMUNG

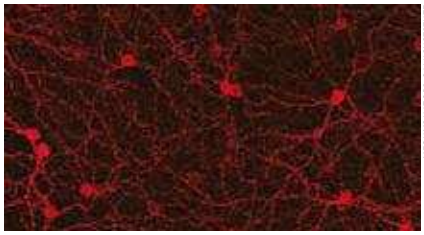
Die blinde Uhr

■ Im menschlichen Auge erzeugen zwei Arten von Rezeptoren ein Bild der Außenwelt: Zapfen und Stäbchen. Retinale Ganglienzellen, ein weiterer Zelltyp in der Netzhaut, produzieren ebenfalls ein lichtempfindliches Pigment namens Melanopsin, sind aber nicht am Sehvorgang beteiligt. US-Forscher haben jetzt gezeigt, dass diese Zellen anhand des Lichteinfalls den zirkadianen Rhythmus, die innere Uhr, an den Tageslauf anpassen.

Megumi Hatori vom Salk Institute for Biological Studies in San Diego (Kalifornien) und ihre Kollegen schufen transgene Mäuse, deren Melanopsin erzeugende Ganglienzellen sie mit Diphterietoxin gezielt abtöten konnten. Der tägliche Aktivitätszyklus der Nager hat eine natürliche Periode von etwas unter 24 Stunden. Ihre innere Uhr geht also leicht vor, wenn sie nicht durch den natürlichen Tagesrhythmus nachjustiert wird. Diese Justierung übernehmen, wie sich nun erwies, die Melanopsin erzeugenden retinalen Ganglienzellen.

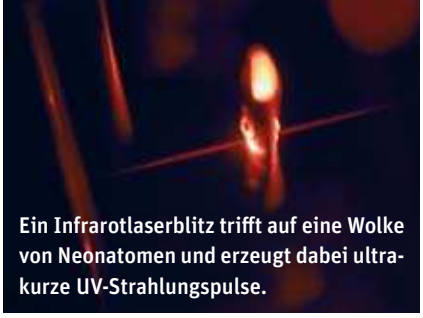
Vor deren Zerstörung lebten die Tiere ganz normal im Gleichtakt mit der Beleuchtung. Nach der Behandlung mit Diphterietoxin ließ sich ihr Aktivitätszyklus mit Licht jedoch nicht mehr beeinflussen: Die innere Uhr war blind geworden. Die Forscher wollen nun Beschwerden wie Jetlag oder Schlaflosigkeit, die mit Störungen der inneren Uhr zusammenhängen, durch medikamentöse Beeinflussung der retinalen Ganglienzellen zu Leibe rücken.

PLoS one, Bd. 3, S. e2451



MEGUMI HATORI, SALK INSTITUTE FOR BIOLOGICAL STUDIES

Die Melanopsin produzierenden retinalen Ganglienzellen (rot angefärbt) sind für die Justierung der inneren Uhr verantwortlich.



THORSTEN NAESER

Ein Infrarotlaserblitz trifft auf eine Wolke von Neonatomen und erzeugt dabei ultrakurze UV-Strahlungspulse.

PHYSIK

Ultrakurze Lichtblitze

■ Einem Team um Eleftherios Goulielmakis vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik ist es gelungen, die bislang kürzesten Laserpulse der Welt zu erzeugen. Nur 80 Attosekunden (milliardstel millardstel Sekunden) lang sind die Blitze aus UV-Licht, die in der Garchinger Apparatur entstehen.

Um sie zu erhalten, richten die Forscher einen etwa dreißigmal längeren Infrarotlaserpuls auf Neonatome. Der ist mit nur 2,5 Femtosekunden – eine Femtosekunde entspricht tausend Attosekunden – allerdings auch schon sehr kurz und misst lediglich gut eine Wellenlänge: zwei Berge mit einem tiefen Tal dazwischen. An diesen drei Extrempunkten erreicht das elektrische Feld des Lichts eine solche Stärke, dass es den Edelgasatomen Elektronen entreißt, sie aber, sobald sich die Richtung des Wechselfelds umkehrt, sofort zu den Atomen zurückschleudert. Beim Aufprall werden ultraschnelle Elektronenschwingungen ausgelöst, die nur wenige Attosekunden dauern. Diese oszillierenden Elektronen senden dann genauso kurze Blitze im extremen Ultraviolettbereich aus – drei pro Infrarotphoton. Der mittlere aus diesem Trio ist besonders intensiv und wird mit speziell beschichteten Röntgenspiegeln herausgefiltert.

Mit den Attosekundenpulsen wollen die Forscher nun Vorgänge untersuchen, die bislang der direkten Beobachtung nicht zugänglich waren, zum Beispiel die Übertragung von Energie zwischen zwei Elektronen. Diese Daten erlauben Rückschlüsse auf die physikalischen Mechanismen, die allen chemischen und biologischen Prozessen zu Grunde liegen.

Science, Bd. 320, S. 1614

VERHALTEN

Nistplatzsuche mit den Ohren

■ Bislang galt unter Biologen als selbstverständlich, dass Vögel ihre Nistplätze danach aussuchen, welche Orte am meisten Schutz bieten. Doch nicht alle scheinen diese Mühe auf sich zu nehmen. Der Blaurückenwaldsänger *(Dendroica caerulescens)* jedenfalls macht sich, wie US-Ornithologen nun in einem Freilandversuch feststellten, die Sache einfach: Er hört sich um, wo lautes Tirilieren von Artgenossen verrät, dass hier die Brut erfolgreich war. Diese Stelle merkt er sich für die nächste Saison.

Wenn ihre Nestlinge flügge werden, zwitschern bei den Blaurückenwaldsängern die stolzen Väter bis zu fünfmal so eifrig wie Männchen ohne Junge – wahrscheinlich, um dem Nachwuchs den artspezifischen Gesang beizubringen. Verhaltensforscher um Matthew Betts von der Oregon State University in Corvallis schnitten dieses väterliche Pfeifkonzert mit und spielten es anderswo ab. Dabei wählten sie allerdings völlig ungeeignete Nistplätze. Trotzdem fanden sich dort im nächsten Frühjahr zahlreiche Brutpaare ein.

Wie die Auswertung des Versuchs zeigte, stuften die Vögel den Wert des erlauschten Gezwitschers viermal so hoch ein wie das Ergebnis der visuellen Inspektion. Das mag töricht erscheinen, ist unter normalen Umständen aber vorteilhaft: Die Vögel finden so schneller gute Nistplätze und können flexibler auf ökologische Veränderungen reagieren. Bislang ist *D. caerulescens* die einzige Art, bei der dieses Verhalten beobachtet wurde. Nach Ansicht der Forscher dürften jedoch auch andere Singvögel den Trick nutzen.

Proceedings of the Royal Society Online-Vorabveröffentlichung

US FISH AND WILDLIFE SERVICE (US FWS)

Blaurückenwaldsänger mit Jungen

PLANETOLOGIE

Der größte Krater im Sonnensystem

■ Eines der ältesten Rätsel des Mars betrifft die eklatanten topografischen Unterschiede zwischen seinen beiden Hälften: Einem stark verkraterten Hochland im Süden steht im Norden eine relativ glatte, jüngere Tiefebene gegenüber. Forscher vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge konnten jetzt belegen, dass dieses Becken, das 42 Prozent der Marsoberfläche ausmacht, ein gigantischer, über vier Milliarden Jahre alter Einschlagkrater ist.

Diese These ist zwar so alt wie das Wissen um das Phänomen selbst. Die Form des Tieflands schien jedoch zu unregelmäßig für einen Krater. Ein Team um Jeffrey C.

JEFFREY C. ANDREWS-HANNA, MIT

Illustration des Asteroiden-Einschlags, der nach neuesten Erkenntnissen das nördliche Tiefland des Mars formte

Andrews-Hanna konnte diesen Einwand jetzt entkräften. Wie es durch Messungen der lokalen Gravitation im Verhältnis zur Topografie zeigte, bildet das nördliche Tiefland tatsächlich eine fast perfekte Ellipse. Sie ist an der Oberfläche nur deshalb nicht zu erkennen, weil die jüngere Tarsis-Region mit dem Vulkan Olympus Mons einen Teil der Struktur überdeckt.

Per Computersimulation ermittelte Margarita Marinova vom California Institute of Technology in Pasadena, dass sich Form und Größe des Beckens mit dem Einschlag eines 1600 bis 2700 Kilometer großen Asteroiden erklären lassen, der mit sechs bis zehn Kilometern pro Sekunde in einem Winkel von 45 Grad aufprallte. Durch einen solchen schrägen Einschlag ist auch das – allerdings viel kleinere – Hellas-Becken auf der Südhalbkugel des Mars entstanden.

Nature, Bd. 453, S. 1216

Mitarbeit: Lars Fischer

NASA, STS-124, CREW, EXPEDITION 17 CREW

Weltraumroboter in Aktion

Wer um Himmels willen turnt da auf der Internationalen Raumstation herum? Etwa ein Alien? Nein, bewahre! Es ist nur ein Roboter mit zwei drei Meter langen, hochgradig beweglichen Armen, der seit März dieses Jahres ferngelenkt Wartungsarbeiten im Außenbereich durchführt und so den Astronauten manchen Weltraumspaziergang erspart. In Kanada gebaut, hört er auf den Namen Dextre (von englisch *dexterity*, Geschicklichkeit). An seinen Arbeitsplatz kann er mit dem kanadischen Roboterarm 2 oder der Laufkatze gebracht werden. Auf dem Foto vom Juni hilft er bei der Installation des japanischen Forschungslabors Kibo.

MATHEMATIK

Entwicklung von Rekorden in der Leichtathletik

Mit mathematischen Mitteln gelingt es, echten Fortschritt und Zufall in ihrem Einfluss auf sportliche Höchstleistungen zu trennen.

Von Daniel Gembris

Warum werden sportliche Rekorde immer wieder übertrumpft? Gängige Antworten lauten: Die Sportler trainieren härter und geschickter, sie stärken sich mit erlaubten oder unerlaubten Mitteln, sie verwenden neue Techniken oder bessere Ausrüstung. Doch es gibt eine viel einfachere Erklärung: den Zufall. Wenn ein Hochleistungssportler gut vorbereitet an den Start geht, dann entscheiden über die letzten Zentimeter oder Zehntelsekunden, auf die es für eine neue Bestmarke ankommt, auch rein zufällige Einflüsse wie der Wind, die Temperatur und die Tagesform.

Sofern es also an der Technik, sagen wir, des Weitsprungs, nichts Entscheidendes mehr zu verbessern gibt, kann man mit Fug und Recht unterstellen, dass eine einzelne Sprungweite das Ergebnis eines Zufallsexperiments ist und alle solchen Experimente voneinander unabhängig sind. In diesem Fall sollte die Wahrscheinlichkeitsverteilung in guter Näherung einer gaußschen Glockenkurve entsprechen, und zwar für eine bestimmte Disziplin bei vergleichbarer Datenerhebung stets derselben. Natürlich wird es dann immer schwieriger, einen neuen Rekord aufzustellen; denn je mehr Zeit vergeht, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine außergewöhnlich gute Leistung bereits erbracht wurde, und desto geringer die Chance, sie noch zu übertreffen.

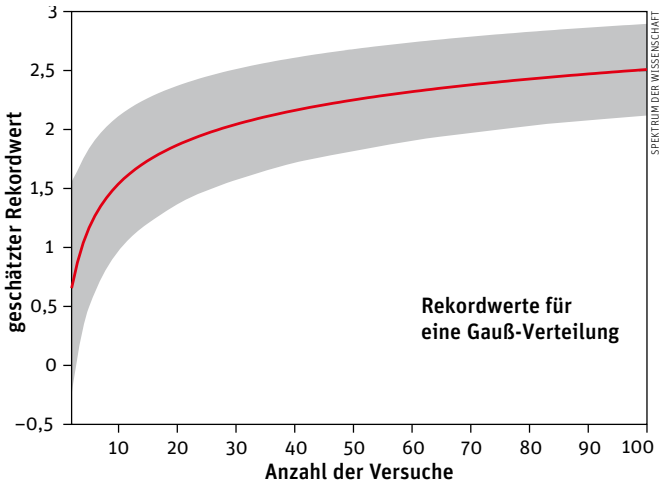
Bei unabhängigen Realisierungen ein und derselben Gauß-Verteilung entpuppt sich die jeweilige Bestmarke im Wesentlichen als Funktion von ln (ln N), wobei N die Zahl der Jahre bezeichnet. Der natürliche Logarithmus ln macht aus einer linearen eine sehr langsame Zunahme, die extrem gering wird, wenn man ihn zweimal hintereinander anwendet. So ist ln100 = 4,605 und ln(ln100) = 1,527, während der Logarithmus von einer Million auch nur 31,816 und dessen Logarithmus 2,626 beträgt.

Eine Gauß-Verteilung ist gekennzeichnet durch ihren Mittelwert μ, den Punkt, an dem die Glockenkurve ihr Maximum erreicht, und ihre Standardabweichung σ, die ein Maß für die Breite der Verteilung darstellt. Die zugehörige Rekordkurve lässt sich sehr präzise durch die Formel

$$x_{\max} = \mu + \sigma\left(a_0 + a_1 \ln(\ln N) + a_2 (\ln(\ln N))^2\right)$$

mit den Koeffizienten $a_0 = 0{,}818$, $a_1 = 0{,}574$ und $a_2 = 0{,}349$ wiedergeben (Bild unten links). Angenommen, der Mittelwert für den Weitsprung der Herren betrage 7,94 Meter und die Standardabweichung 12 Zentimeter (abgeschätzt aus den Rekorddaten für die Jahre 1973 bis 1984), dann läge die erwartete Bestmarke im zweiten Jahr bei 8,01 Metern und nach 50 Jahren bei 8,21 Metern. Nochmals 50 Jahre später wären nur noch lumpige drei Zentimeter dazugekommen.

Dieses theoretische Ergebnis liefert eine gute Messlatte, um zu bestimmen, ob die Entwicklung der tatsächlich beobachteten Rekordwerte allein durch den Zufall zu erklären ist. Zusammen mit meinen Kollegen John G. Taylor und Dieter Suter habe ich die Ergebnisse der Deutschen Meisterschaften in 22 Disziplinen aus dem Zeitraum 1973 bis 1996 ausgewertet; später kamen die Weltjahresbestleistungen und schließlich Resultate für afrikanische, asiatische und andere europäische Länder hinzu *(Journal of Applied Statistics, Bd. 34, S. 529)*.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Links: Der Schätzwert (rot, mit grauem Fehlerintervall von einer Standardabweichung) für den Rekord eines »Wettkampfs«, der aus Zufallsexperimenten mit einer Gauß-Verteilung besteht, steigt mit der Zahl der Experimente zunächst rasch, später quälend langsam an. Die dieser Grafik zu Grunde liegende Gauß-Verteilung hat den Mittelwert 0 und die Standardabweichung 1.

Rechts: Der Weltrekord im 110-Meter-Hürdenlauf scheint sich rein stochastisch entwickelt zu haben. Dagegen zeigt der Zeitverlauf für den 5000-Meter-Lauf ab 1994 einen starken Trend, der nicht durch Zufall zu erklären ist. Die Parameter für die Schätzwerte (rot mit grauem Fehlerintervall) wurden aus den Ergebnissen für den Referenzzeitraum 1980 bis 1989 errechnet; die beobachteten Rekordwerte sind durch eine blaue Linie verbunden.

DPA / SVEN SIMON

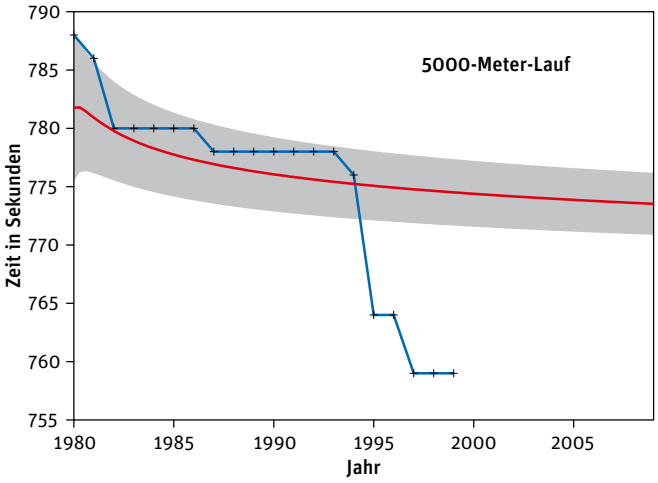
Die deutsche Ausnahmeathletin Heike Drechsler stellte in den 1980er Jahren Weltrekorde in drei Disziplinen auf: im Weitsprung, 200-Meter-Lauf und Siebenkampf (bei den Junioren).

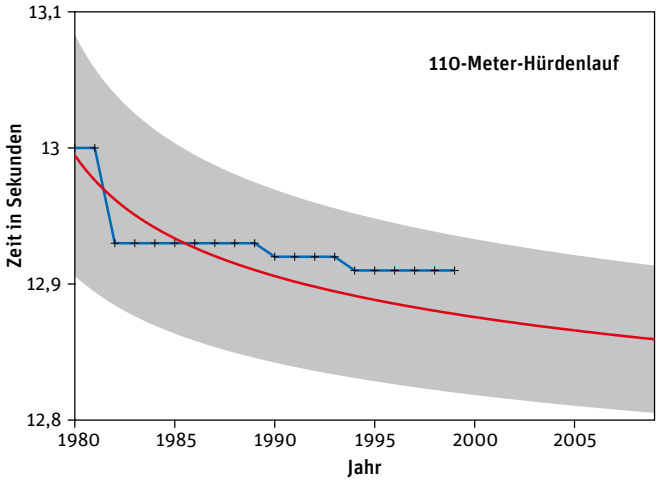
Wir verwendeten die Jahre 1973 bis 1984 als Referenzzeitraum, um daraus die Parameter μ und σ zu bestimmen, und analysierten die Jahre 1985 bis 1996 mit den so ermittelten Größen.

Natürlich kann auch während des Referenzzeitraums ein nicht zufälliger Trend wirksam gewesen sein. Um ihn zu berücksichtigen, haben wir vor der Berechnung von μ und σ eine Ausgleichsgerade durch die entsprechenden Daten gelegt und deren Werte von den beobachteten Rekorden subtrahiert. Für μ nahmen wir den Wert der Ausgleichsgeraden am Ende des Referenzintervalls.

Für die deutschen Meisterschaften zeigt sich nur in vier Fällen eine deutliche Abweichung von einer rein zufallsbedingten Entwicklung: 110-Meter-Hürdenlauf, 20 und 50 Kilometer Gehen sowie Stabhochsprung. Hier gab es also eine, wie auch immer begründbare Leistungssteigerung. Generell ist eine Abnahme systematischer Verbesserungen über den Analysezeitraum zu beobachten. Eine »Sättigung« ließ sich vor allem für Deutschland und England feststellen.

Die Auswertung der Weltjahresbestleistungen zeigte deutlichere Leistungs-





BEIDE GRAFIKEN: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: DANIEL GEMBRIS

steigerungen auf internationaler Ebene, weshalb wir nur die Resultate ab 1980 betrachteten. Als Referenzintervall wählten wir die Dekade von 1980 bis 1989 und wandten die Ergebnisse auf den Zeitraum von 1990 bis 1999 an. Diesmal waren 7 von 19 Schätzungen um mehr als drei Standardabweichungen vom tatsächlichen Bestwert entfernt, was sehr stark auf eine echte Verbesserung hinweist.

Für die Weltjahresbestleistungen haben wir nicht nur den wahrscheinlichen Rekordwert für ein längeres Zeitintervall, sondern für jedes Jahr einzeln berechnet und obendrein in die Zukunft extrapoliert. Die größten nicht zufälligen Leistungssteigerungen ergaben sich für die afrikanischen und asiatischen Länder, aber auch hier lässt das Wachstum allmählich nach.

Für unsere Rekordanalyse sind Phasen relativer Stagnation erforderlich. Da für Frauen deutliche Leistungssteigerungen bis in die 1980er Jahre vorliegen, wäre die Datenbasis zu klein gewesen. Daher haben wir nur die Ergebnisse für die männlichen Athleten betrachtet.

Zwei Einwände lassen sich gegen unser Verfahren erheben. Erstens ist auch eine Jahresbestleistung so etwas wie ein Rekord und muss deshalb nicht einer Gauß-Verteilung genügen, selbst wenn die Leistungen aller Athleten in diesem Jahr das tun. Es stellt sich jedoch heraus, dass der dadurch in die Analyse eingeführte Fehler klein ist und vor allem den Effekt hat, dass Rekorde eher unter- als überschätzt werden.

Zweitens ist ganz allgemein die Gauß-Verteilung unrealistisch, indem sie – zum Beispiel – selbst negativen oder physiologisch vollkommen unmöglichen Sprungweiten noch eine gewisse, wenn auch extrem geringe Wahrscheinlichkeit zuweist. Aber eine Kontrollrechnung mit einer »abgeschnittenen« Verteilung, in der die Wahrscheinlichkeiten für solche unmöglichen Werte auf null gesetzt wurden, zeigt, dass sich der Effekt dieses Fehlers vernachlässigen lässt.

Hinweise auf Doping

Generell liefert die oben genannte Formel eine einfache Erklärung für manchen positiven Trend im Sport: Maximalleistungen werden allein schon durch Zufall besser, indem man mehr Leute in die Talentsuche einbezieht. Man stelle sich vor, ein Talentsucher bitte einen Kandidaten nach dem anderen um eine Probe seiner Fähigkeiten und merke sich jeweils den bisher Besten und dessen Leistungen. Dann folgt dieser Rekord – im Rahmen der Fehlergrenzen – der Formel mit dem doppelten Logarithmus; nur ist die Variable N jetzt die Anzahl der bisher geprüften Kandidaten. Dass der Anstieg für sehr große N sehr langsam ist, erklärt, warum die deutschen Rekorde nach der Wiedervereinigung keinen nennenswerten Sprung nach oben machten: Die Zahl der Kandidaten wuchs zwar absolut gesehen erheblich an, aber N war schon vorher ziemlich groß.

Ebenso eignet sich die Formel, um aus der durchschnittlichen Körpergröße und ihrer Streuung den aktuellen Weltrekord zu schätzen oder – völlig abseits vom Sport – aus verrauschten physikalischen Messdaten den interessanten Anteil herauszufiltern. Weil die Abhängigkeit von der Zahl der »Messwerte« sehr schwach ist, funktionieren Extrapolationen über mehrere Größenordnungen sehr zuverlässig.

Bei Rekorden, die innerhalb einer kurzen Zeitspanne deutlich über das Vorhersageintervall hinausschießen, bietet Doping eine mögliche Erklärung. Weiteren Aufschluss darüber erhielten wir mit einem zusätzlichen statistischen Verfahren, dem Chow-Test. Dabei teilt man eine Zeitreihe in zwei Intervalle auf und bestimmt für jedes eine Ausgleichsgerade. Starke Abweichungen zwischen den beiden Geraden weisen auf »strukturelle Brüche« hin.

Einer solchen Analyse zufolge gab es nach der Einführung eines neuen Dopingtests im Jahr 1988 in vielen Disziplinen einen deutlichen Knick in der Leistungsentwicklung, vor allem auf internationaler Ebene, aber auch bei den Deutschen Meisterschaften.

Mathematische Methoden eignen sich also zum Aufspüren von Unregelmäßigkeiten. Denen kann dann mit chemischen Nachweisverfahren weiter nachgegangen werden.

Daniel Gembris ist promovierter Physiker und arbeitet als Methodenentwickler beim Forschungsgerätehersteller Bruker BioSpin MRI GmbH in Ettlingen.

KREBSTHERAPIE Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Laserskalpell mit Tiefenwirkung

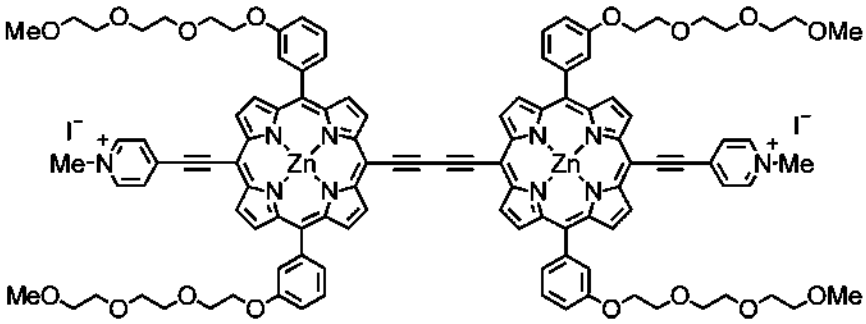
Bei der fotodynamischen Therapie macht ein Sensibilisator Zellen empfindlich gegenüber Laserstrahlung. Eine neue Lichtantenne verbessert die Präzision dieser Methode und erweitert ihre Einsatzmöglichkeiten.

Von Michael Groß

Mit Licht unerwünschtes Gewebe zu zerstören, ist in der Augenheilkunde schon seit Langem gängige Praxis. Bei der feuchten Form der altersbedingten Makuladegeneration, der häufigsten Ursache der Erblindung von Menschen über 55, beeinträchtigt die Bildung unnötiger Blutgefäße das Sehvermögen. Die Ärzte zerstören diese Äderchen und verhindern ihre weitere Ausbreitung, indem sie einen scharf fokussierten Laserstrahl darauf richten, nachdem sie dem Patienten eine lichtempfindliche Chemikalie injiziert haben.

Wo das Laserlicht auf diesen Sensibilisator trifft, befördert es ihn – dank der passend gewählten Wellenlänge – in einen angeregten Zustand. Der wiederum gibt die aufgenommene Energie an Sauerstoff weiter, der in den meisten Zellen reichlich vorhanden ist. Dabei entsteht die aggressive »Singulett«-Form des Gases, welche die umliegenden Zellen zerstört.

Das Auge eignet sich für eine solche Behandlung insofern besonders gut, als



HAZEL A. COLLINS ET AL., NATURE PHOTONICS 2008, BD. 2, S. 394

Dieser neue Sensibilisator (Strukturbild) macht Krebszellen auch für Infrarotstrahlung empfindlich, die deutlich tiefer in Gewebe eindringen kann als sichtbares Licht. Er besteht aus zwei Porphin-Ringen, die durch einen leitfähigen molekularen »Draht« verbunden sind.

es durchsichtig ist und seine Linse einfallendes Licht bündelt. Die fotodynamische Therapie (FDT) wird aber auch gegen leicht zugängliche Krebsgeschwüre eingesetzt – etwa auf der Haut. Bei tief sitzenden Tumoren – zum Beispiel in Leber oder Niere – ist sie dagegen nicht ohne Weiteres anwendbar. Hinderlich wirken hier die geringe Eindringtiefe des Lichts in den Körper und die Schwierigkeit, es innerhalb des stark streuenden Gewebes zu fokussieren.

Doch nun haben Chemiker an der University of Oxford ein Molekül entwickelt, das diese beiden Probleme auf einen Streich zu lösen verspricht. Der Arbeitsgruppe von Harry L. Anderson gelang die gezielte Synthese von Lichtantennen, für deren Aktivierung zwei Photonen auf einmal nötig sind *(Nature Photonics, Bd. 2, S. 420)*. Bei einer solchen paarweisen Anregung braucht jedes Lichtquant nur halb so viel Energie. Der Laserstrahl hat folglich etwa die doppelte Wellenlänge. Langwelliges Licht aber kann tiefer in Gewebe eindringen.

Auch die Treffgenauigkeit ist bei dem neuen Sensibilisator deutlich höher. Damit er angeregt wird, müssen zwei Photonen gleichzeitig darauf stoßen. Die Wahrscheinlichkeit dafür sinkt jedoch drastisch – mit der vierten Potenz – mit dem Abstand vom Brennpunkt des Laserstrahls.

Auf der Suche nach einer solchen Lichtantenne synthetisierte das Team aus Oxford eine ganze Palette neuer Verbindungen, die sich vom Porphin ableiten. Das ist ein ringförmiges Molekül, das als zentraler Bestandteil im Häm des roten Blutfarbstoffs und im Chlorophyll der Pflanzen vorkommt. Als besonders viel versprechend erwies sich eine Gruppe von Substanzen, in denen zwei Porphin-Ringe über einen elektrisch leitfähigen molekularen »Draht« miteinander verbunden sind.

Mit einem dieser Moleküle, das für die FDT am besten geeignet schien (Bild oben), reiste Andersons Doktorandin Hazel A. Collins schließlich von Oxford nach Toronto (Kanada), um im Labor von Brian C. Wilson medizinische Tests durchzuführen.

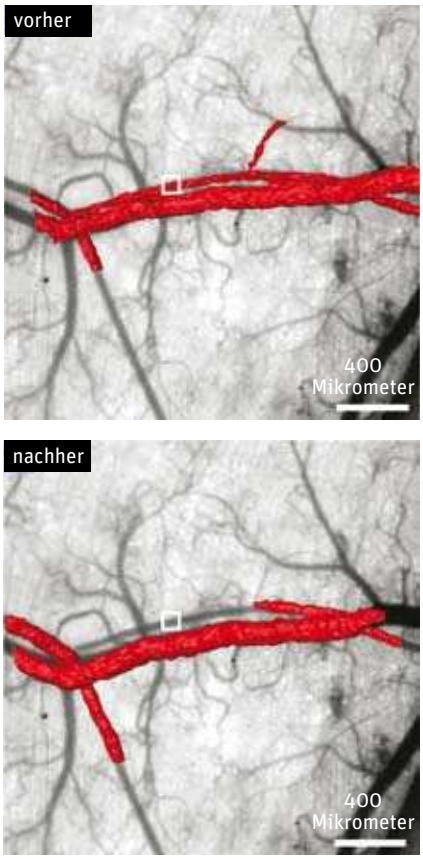
Die Ergebnisse waren ermutigend. So ließ sich mit der neuen Lichtantenne im Tierversuch per Laserbestrahlung im Nah-Infrarot (bei einer Wellenlänge von 920 Nanometern) mit hoher Präzision eine feine Ader einen halben Millimeter unter der Haut veröden (Bild links). Zellen in der Umgebung wurden nicht beeinträchtigt; denn da sie in diesem Wellenlängenbereich praktisch durchsichtig sind, absorbierten sie nur so wenig Laserlicht, dass sie sich nicht nennenswert erwärmten.

In Geweben aus vielen Zellschichten kommt es allerdings zu Streueffekten, welche die Durchlässigkeit verringern. Die Eindringtiefe ist deshalb auch für Nah-Infrarot-Licht begrenzt. Doch dürfte sie nach Einschätzung der Wissenschaftler immerhin bei mehr als einem Zentimeter liegen. Das entspricht dem 2,5-Fachen des Werts beim bisher verwendeten sichtbaren Licht. Charles Spangler von der Montana State University in Bozeman will deshalb die Zwei-Photonen-Methode zur nicht invasiven Behandlung von Brustkrebs einsetzen und hat zu diesem Zweck bereits die Spin-off-Firma Rasiris Inc. gegründet.

Bekämpfung tieferer Krebsherde möglich

Auch tiefere Krebsherde dürften in Verbindung mit endoskopischen und operativen Eingriffen leichter zugänglich werden. Das sollte vor allem die Lichtbehandlung kleiner Tumoren in empfindlicher Umgebung wie dem Gehirn ermöglichen.

Die fotodynamische Therapie ist in der Europäischen Union und Nordamerika schon zur Bekämpfung mehrerer Krebsarten zugelassen. Der seit den 1990er Jahren erhältliche Sensibilisator Porfimer kommt zum Beispiel bei Tumoren in der Speiseröhre, den Lungen, der Harnblase und dem Gebärmutterhals zum Einsatz. In all diesen Fällen werden zur Bestrahlung Lichtleiter durch Körperöffnungen eingeführt. Anderson ist überzeugt, dass auch hier die neuen Sensibilisatoren eine entscheidende Verbesserung bringen, indem sie die Eindringtiefe der Strahlung erhöhen.



HAZEL A. COLLINS ET AL., NATURE PHOTONICS 2008, BD. 2, S. 394

Mit dem neuen Sensibilisator ließ sich gezielt ein feines Äderchen verschließen. Der weiße Kasten markiert die bestrahlte Stelle.

Michael Groß ist promovierter Biochemiker und Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

INFORMATIK

Superrechner mit Playstation-Chips

Der schnellste Computer der Welt vollführt eine Billiarde elementarer Rechenakte in der Sekunde – und wurde zu wesentlichen Teilen in Böblingen entworfen.

Von Christoph Pöppe

Hier ist der Platz, wo der technische Fortschritt noch immer in atemberaubendem Tempo stattfindet, und das seit mehr als 40 Jahren: das Hochleistungsrechnen. In diesem Frühsommer wurde wieder einmal eine psychologisch wichtige Messlatte übersprungen: Der nunmehr schnellste Computer der Welt schafft mehr als 10^{15} (eine Billiarde) Rechenoperationen pro Sekunde.

Noch 1997 war es eine Sensation, dass der Rechner ASCI Red von Intel die Billionengrenze durchstieß, und 1986 hatte der Vektorrechner Cray 2 Schlagzeilen gemacht, weil er eine Milliarde Multiplikationen in der Sekunde schaffte. Alle elf Jahre muss man sich also wieder aufs Neue an eine der selten gebrauchten Vorsilben für große Vorfaktoren gewöhnen: Nach Giga- (10^9) und Tera- (10^{12}) sind jetzt Petaflops (10^{15} »floating point operations per second«, Gleitkommaoperationen pro Sekunde) das Maß der schnellsten Rechner. Ein Faktor 1000 in elf Jahren, das ist eine knappe Verdopplung pro Jahr und damit noch deutlich mehr, als dem viel zitierten mooreschen Gesetz entspricht.

Dabei hatte dieser empirischen Regel schon mehrfach das Totenglöckchen geläutet. Unbestreitbar stößt die Miniaturisierung der elementaren Bauteile an natürliche Grenzen. Die Breite der kleinsten Strukturen mag in den kommenden Jahren von 45 Nanometern, dem gegenwärtigen Stand der Technik, auf 32 Nanometer sinken, aber nicht wesentlich tiefer: Ein Bit muss schließlich durch eine Mindestzahl von Atomen repräsentiert werden, wenn ein Schaltkreis zuverlässig funktionieren soll.

Da sich die Wege für die elektrischen Impulse nicht weiter verkürzen lassen, nimmt auch die Schaltgeschwindigkeit nicht mehr nennenswert zu. Nur höherer Energieeinsatz könnte die Bits noch schneller umspringen lassen, aber dann stellt sich die Frage, wohin mit der Energie. Die Zeiten, als ein Chip nur so viel Wärme pro Quadratzentimeter abstrahlte wie ein Bügeleisen oder eine Herdplatte, sind schon lange vorbei. Inzwischen kann es das kleine Plättchen bei der Heizleistung pro Flächeneinheit mit einem Kernreaktor aufnehmen.

IBM

Auffälligstes Merkmal des Bauteils namens QS22, das zu Tausenden in dem Rekordcomputer »Roadrunner« Verwendung findet, sind die großflächigen rötlichen Kühlrippen aus reinem Kupfer.

Um das absehbare Ende des mooreschen Gesetzes noch ein wenig hinauszuzögern, packten Computertechniker vor wenigen Jahren mehrere Prozessoren auf einen Chip (Spektrum der Wissenschaft 3/2005, S. 90), wo sie über einen gemeinsamen Zwischenspeicher (»Cache«) miteinander kommunizieren; dabei dürfen sie einander beim Rechnen nicht ins Gehege kommen.

Grafikkarte als Prozessor

Inzwischen ist aus der Not eine Tugend und »Multicore« der neue Standard geworden: Unter den Rechnern der »Top 500«, der halbjährlich aktualisierten Liste der 500 leistungsfähigsten Computer der Welt, überwiegen bereits die Geräte mit vier Prozessoren pro Chip, acht Stück sind Stand der Technik, über noch wesentlich mehr wird bereits intensiv nachgedacht. Und das mooresche Gesetz gilt in alter Frische weiter.

Die neue Rekordmaschine heißt »Roadrunner«, kommt aus dem Hause IBM und steht im Nationallaboratorium in Los Alamos (New Mexico). Bei der jüngsten Internationalen Supercomputer-Konferenz im Juni dieses Jahres in Dresden wurde ihr feierlich und offiziell Platz 1 der Top 500 zugesprochen. Damit hat »Roadrunner« den bisherigen Rekordhalter Blue Gene /L nach immerhin dreieinhalb Jahren Regentschaft vom Thron gestoßen.

Auch der nun übertrumpfte Rechner stammt von IBM. Überhaupt dominieren die Produkte dieser Firma die Top 500 mit einem Anteil von 48 Prozent der installierten Leistung. Und da IBM ebenso wie einige Konkurrenten vorzugsweise Prozessoren von Intel einsetzt, trägt dieser Chiphersteller drei Viertel zur Gesamtleistung der Top 500 bei.

Ein Kommen und Gehen herrscht auch auf den unteren Plätzen in der Liste. Allein im letzten halben Jahr sind 300 neue Maschinen hinzugekommen und haben ebenso viele alte verdrängt. Um überhaupt noch aufgeführt zu werden, muss ein Computer schon 9 Teraflops bieten, so viel wie 1997 alle 500 Computer der Liste zusammen.

Wie erreicht der »Roadrunner« seine spektakuläre Spitzenleistung? Durch Mas-

Der Namenspate

Der Roadrunner (Großer Rennkuckuck) ist der Staatsvogel des US-Bundesstaates New Mexico. Er fliegt nicht gern, läuft jedoch ausdauernd und mit hoher Geschwindigkeit und wird sogar offiziell als »komischer Vogel« bezeichnet. Ihm nachempfunden ist die gleichnamige Cartoonfigur von Chuck Jones, die nach dem Vorbild von »Tom und Jerry« ihren Verfolger, den Kojoten Wile E. Coyote, stets lächerlich aussehen lässt – Grund genug für die Forscher am Los Alamos National Laboratory (LANL), ihren Supercomputer mit diesem Namen mit Lokalkolorit zu versehen, zum Verdruss der Herstellerfirma IBM, die vergeblich die Verwendung des Namens zu unterbinden versuchte.

se und geschickte Verknüpfung von Standardteilen – das war bisher das Erfolgsrezept von IBM. Das trifft auch diesmal insofern zu, als die Maschine ungefähr 120 Millionen Dollar gekostet hat, 650 Quadratmeter Grundfläche bedeckt, reichlich 2000 Tonnen wiegt und aus 6480 gleichen Exemplaren desselben Bauteils besteht. Nur ist dieses so genannte TriBlade kaum als Standardteil zu bezeichnen. Es besteht aus einem eher gewöhnlichen Chip namens »Opteron« von AMD sowie zwei Platinen namens QS22, die eigentlich als Grafikkarten für eine Playstation von Sony entwickelt worden waren und für ihren neuen Zweck nur geringfügig modifiziert werden mussten.

Wie kommt eine Hardwarekomponente, die ursprünglich darauf ausgelegt war, möglichst realistische, schnell bewegte Bilder für das Spielen in einer Fantasiewelt zu erzeugen, zu der Ehre, am schnellsten Rechner der Welt mitzuwirken? Auch im gewöhnlichen PC verfügt die Grafikkarte über weit mehr Rechenkapazität als der eigentliche Prozessor, nutzt sie jedoch nur für ganz spezielle Zwecke (Spektrum der Wissenschaft 7/2008, S. 80). Das gilt für eine Playstation ebenso. Im Interesse der hohen Rechenleistung haben die Erbauer des »Roadrunner« sich auf gewisse Einschränkungen in der Programmierbarkeit eingelassen.

Dabei brachen sie mit einer hartnäckigen Tradition des Supercomputing, die schon mehrere Hardwaregenerationen überlebt hat: Um die viele bereits investierte Arbeit nicht wegwerfen zu müssen, pflegt man bislang in der urtümlichen Sprache Fortran zu programmieren. Dabei tauschen die vielen Prozessoren eines Rechners ihre Daten mit einer standardisierten Methode namens MPI *(message passing interface)* aus. Das tun die TriBlades untereinander zwar immer noch; aber die interne Kommunikation verläuft anders. Auf dem QS22 ist sogar der Cache abgeschafft worden. An die Stelle einer Hierarchie von immer kleineren, immer schneller zu erreichenden Zwischenspeichern, über deren Stufen die Daten treppauf zum Prozessor und treppab wieder weggeschafft werden – und möglichst oft auf den oberen Stufen schon kehrtmachen, weil sie wiederverwendet werden –, tritt ein so genannter Datenbus. Daten werden vom Absender in eine Ringleitung eingespeist und laufen dort, bis der Empfänger sie abgreift. Dieses altbacken anmutende Verkehrsmittel verbindet auch die Einzelteile jedes PCs; aber im QS22 übernimmt ein echter Schnellbus mit einer Taktrate von 196 Gigabit pro Sekunde die Kommunikation zwischen den neun Prozessoren eines Chips. Davon erledigen acht die eigentliche Arbeit, und der neunte ist der Aufpasser.

Was anfangen mit so viel Rechenleistung?

Wie üblich wurde die Leistung des Rekordrechners an der Standardaufgabe gemessen, ein voll besetztes lineares Gleichungssystem zu lösen (die »LINPACK benchmark«). Seine eigentliche Arbeit soll er dagegen mit vier großen Anwendungsprogrammen leisten. Die wiederum modellieren physikalische Prozesse wie die Dynamik eines Plasmas, bei denen sehr viele Teilchen Kräfte aufeinander ausüben, oder Strömungsprozesse mitsamt der gefürchteten Turbulenz. Die Experten in Los Alamos haben anderthalb Jahre gebraucht, um die Maschine so zu programmieren, dass ihre Rechenleistung dabei voll oder zumindest zu einem erheblichen Anteil genutzt wird.

In der Podiumsdiskussion aus Anlass des neuen Weltrekords priesen alle Redner artig die große Errungenschaft – und beeilten sich dann, sie zu relativieren. Wie es aussieht, wird der »Roadrunner« in der Petaflops-Klasse nicht lange allein bleiben. Die Konkurrenz von Cray hofft im Herbst nachzuziehen; und anscheinend plant ein japanisches Team einen ähnlichen Überraschungscoup wie vor sechs Jahren, als der »Earth Simulator« mit damals sensationellen 35 Teraflops die Konkurrenz um den Faktor 5 hinter sich ließ und zweieinhalb Jahre lang den Spitzenplatz in der Liste halten konnte.

Die Europäer haben sich daran gewöhnen müssen, mit der maximalen Leistung ihrer größten Computer immer um einen Faktor 4 hinter den dominierenden Amerikanern zurückzuliegen (und wollen seit Kurzem mit einem Projekt namens PRACE diesen Rückstand verkürzen). Da ist es ein gewisser Trost, dass von der 120-köpfigen Arbeitsgruppe, die den »Roadrunner« entwickelt hat, zwei Drittel beim IBM-Forschungszentrum in Böblingen arbeiten.

Die nächste Vorsilbe nach Tera und Peta ist übrigens schon im Gespräch. Ein hochkarätig besetztes Gremium lotet bereits aus, wie man – bis 2019, um den Elfjahresrhythmus einzuhalten – zu einem »Exaflops«-Computer mit 10^{18} Rechenoperationen kommt.

Der elementare Rechenakt, das schlichte Multiplizieren, ist auf die Dauer kaum noch beschleunigungsfähig. Höhere Leistungen lassen sich nur dadurch erzielen, dass man eine ungeheure Anzahl von Prozessoren nebeneinanderstellt. Viel interessanter und schwieriger wird das Problem, viele Millionen von »Fäden« (*threads*, eigenständige Befehlsfolgen) in der Hand zu behalten und zu koordinieren. Nicht mehr das Rechnen selbst, sondern die Bereitstellung der Daten *just in time* wird den größten Teil der elektrischen Leistung verbrauchen.

Nach bisherigen Extrapolationen würde ein Exaflops-Computer ungefähr 120 Megawatt verbrauchen und damit bereits ein mittelgroßes Kraftwerk beschäftigen. (Der »Roadrunner« begnügt sich mit reichlich 2 Megawatt.) Nicht nur die Energie heranzuschaffen, sondern sie nach getaner Arbeit in Form von Wärme auch wieder abzuführen, droht das be-

herrschende Problem für die nächste Generation der Superrechner zu werden.

Lässt sich die viele Rechenleistung denn überhaupt sinnvoll nutzen? Aber sicher. In den USA pflegt man den Rechenbedarf – und den Antrag auf den nächstgrößeren Superrechner – gerne mit der Notwendigkeit zu begründen, das allmähliche Verrosten des Kernwaffenarsenals präzise zu simulieren; denn dessen Funktionsfähigkeit durch Ausprobieren zu überprüfen, verbietet der Atomteststoppvertrag. Aber es gibt auch zivile Anwendungen mit einleuchtenderem Nutzen.

Im Rahmen der großen Klimadebatte interessiert es neuerdings die Regierungen zahlreicher Länder, welche Auswirkungen der Klimawandel nicht nur global, sondern auf ihr eigenes Land haben wird. Solche Fragen können bisherige Klimamodelle nicht befriedigend beantworten, weil das gedachte Netz, das zum Rechnen über die Erde gelegt wird, dafür zu weitmaschig ist. Bei den heutigen Computerkapazitäten sind allenfalls zehn Kilometer Maschenweite in globalem Maßstab erreichbar. Maximal ein Kilometer wäre aber nötig, um kleinräumige Phänomene mit großer Wirkung korrekt aufzulösen. Ein Faktor 10 in der Maschenweite macht einen Faktor 10 000 im Rechenaufwand; denn die Verfeinerung muss in drei Raum- und einer Zeitkoordinate zugleich stattfinden. Selbst in elf Jahren werden die Klimaforscher also noch unerfüllte Wünsche nach Rechenkapazität haben.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

HIRNFORSCHUNG 🔊 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Leuchtende Lügen

Herkömmliche Lügendetektortests sind nur bedingt verlässlich. Nun sollen Magnetresonanz-Hirnaufnahmen verraten, ob eine Person die Wahrheit sagt. Ist ihnen eher zu trauen?

Von Gary Stix

Vor einem Jahr erschien im britischen Fernsehen eine dreiteilige Serie namens »Lie Lab« (»Lügenlabor«). Sie berichtete über Versuche des Medizinprofessors Sean A. Spence von der University of Sheffield, durch Abbildungen der Hirnaktivität mittels funktioneller Magnetresonanztomografie (fMRT) zwischen wahren und erlogenen Behauptungen zu unterscheiden. Unter anderem nahm der Forscher Hirnscans einer Frau auf, die dafür verurteilt worden war, ein ihr anvertrautes Kind mit einer Überdosis Salz vergiftet zu haben. Das Resultat gab zu denken: Es legte nahe, dass die Unschuldsbeteuerungen der Frau der Wahrheit entsprachen. Spence veröffentlichte die betreffenden Untersuchungen später in der Fachzeitschrift »European Psychiatry«.

Herkömmliche Lügendetektoren, so genannte Polygrafen, messen äußerliche Zeichen für Ängstlichkeit wie einen Anstieg von Puls, Blutdruck, Atemfrequenz oder Schweißabsonderung. Die fMRT will die Lüge dagegen direkt an ihrer Quelle aufspüren: im Gehirn. Die Berichte über das Verfahren haben nicht nur einige 100 000 Fernsehzuschauer fasziniert, sondern inzwischen auch geschäftstüchtige Unternehmer auf den Plan gerufen. Zwei US-Firmen – Cephos in Pepperell (Massachusetts) und No Lie MRI in Tarzana (Kalifornien) – behaupten, mit mindestens 90-prozentiger Sicherheit sagen zu können, ob jemand lügt. No Lie MRI schlägt das Verfahren sogar zur »Risikominderung bei Verabredungen« vor.

Viele Neurowissenschaftler und Gerichtssachverständige halten derlei Behauptungen allerdings für höchst fragwürdig. Einige bezweifeln sogar, dass Hirnscans jemals zur Lügendetektion taugen werden. Ihnen scheinen sie allenfalls geeignet, einen Beitrag zur Grundlagenforschung über das Wesen der Täuschung zu leisten.

Beim Flunkern muss sich das Gehirn anstrengen

Bei der fMRT wird anhand der Durchblutung von Gehirnregionen deren Aktivität gemessen. Wie will man damit herausfinden, ob jemand die Wahrheit sagt? Forscher wie Spence glauben, dass sich das Gehirn anstrengen muss, um eine Lüge zu erfinden, und dafür Be-

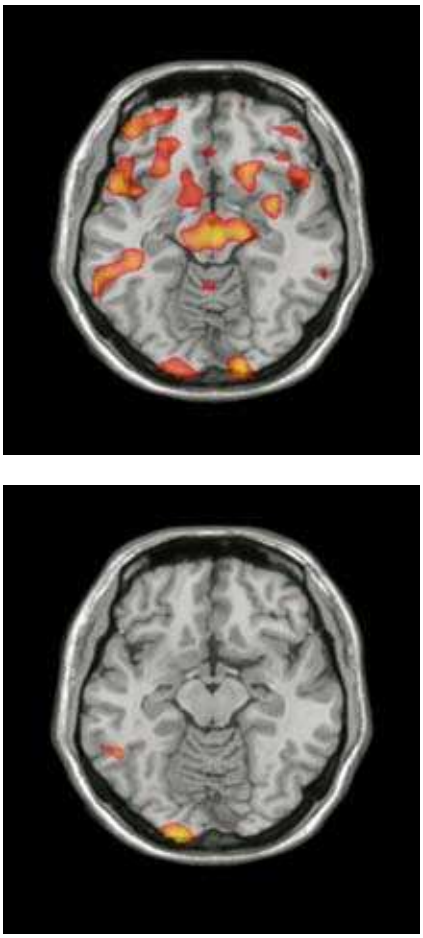
Wenn Ihre CO_2-Emissionen sinken, steigt der Unternehmenswert.

WENIGER REDEN. **MACHEN.** Mehr dazu unter ibm.com/green/de

IBM

IBM, das IBM Logo und ibm.com sind Marken oder eingetragene Marken der International Business Machines Corporation in den Vereinigten Staaten und/oder anderen Ländern. Andere Namen von Firmen, Produkten und Dienstleistungen können Marken oder eingetragene Marken ihrer jeweiligen Inhaber sein. © 2008 IBM Corporation. Alle Rechte vorbehalten.

O&M IBM L 64/08



ANDREW KOZEL UND MARK GEORGE, MEDICAL UNIVERSITY OF SOUTH CAROLINA (MUSC) UND STEVE LAKEN, CEPHOS CORPORATION

Bei einer Frau, die fälschlich behauptete, eine Uhr gestohlen zu haben, leuchteten in der Magnetresonanzaufnahme des Gehirns viele Regionen auf (oben), die bei der korrekten Antwort auf die Frage nach dem Diebstahl eines Rings inaktiv blieben (unten).

reiche zusätzlich aktiviert. Die aber sollten sich entdecken lassen. Nach bisherigen Befunden sind es hauptsächlich Regionen, die mit dem Fällen von Entscheidungen zu tun haben.

Für eine zuverlässige Bewertung, inwieweit sich die fMRT und andere neurowissenschaftliche Methoden für die Strafverfolgung eignen, hat die MacArthur Foundation im vergangenen Jahr zehn Millionen Dollar bereitgestellt. Mit dem Geld finanziert die Stiftung das auf drei Jahre angelegte Projekt »Law and Neuroscience«. Ziel ist unter anderem, Kriterien für die genaue und verlässliche Lügendetektion mit fMRT oder anderen Hirnuntersuchungen zu erarbeiten.

»Beim jetzigen Stand der Technik kann man, glaube ich, den Ergebnissen noch nicht trauen«, meint Marcus Raichle von der Washington University School of Medicine in St. Louis (Missouri), der im Rahmen des Projekts die Studiengruppe über Lügendetektion leitet. »Dennoch halte ich es für vertretbar, ein Forschungsprogramm ins Leben zu rufen, um zu prüfen, ob das überhaupt möglich ist.«

Zweifel an der Zuverlässigkeit

In einem Übersichtsartikel im »American Journal of Law and Medicine« vom vergangenen Jahr verwiesen Henry T. Greenly von der Stanford University (Kalifornien) und Judy Illes, inzwischen an der University of British Columbia bei Vancouver (Kanada), auf die großen noch bestehenden Forschungslücken und machten Vorschläge, wie sich die Methode verbessern ließe. Nach den Schlussfolgerungen der beiden Autoren bleiben die nicht einmal 20 bisher durchgeführten Untersuchungen jedenfalls den Beweis schuldig, dass die fMRT »in der realen Welt auf irgendeinem Zuverlässigkeitsniveau als Lügendetektor taugt«.

Die Liste der aufgeführten Mängel ist lang. In den meisten Fällen wurden Gruppen statt Einzelpersonen getestet. Für das Ergebnis vieler Untersuchungen gibt es keine unabhängige Bestätigung. Versuchsteilnehmer waren junge, gesunde Erwachsene. Niemand weiß daher, wie die Ergebnisse bei Personen aussehen würden, die Blutdrucktabletten einnehmen oder verengte Arterien haben. Die beiden Forscher stellten außerdem die Spezifität der aufleuchtenden Bereiche in Frage; wie sie anmerken, korrelieren die betreffenden Regionen mit einem breiten Spektrum kognitiver Vorgänge – etwa Sich-Erinnern, Selbstkontrolle und bewusste Eigenwahrnehmung.

Die größte Herausforderung – für die das Projekt »Law and Neuroscience« bereits neue Untersuchungen in die Wege geleitet hat – besteht darin, Möglichkeiten zu finden, das Testverfahren weniger künstlich zu gestalten. Fälschlich zu behaupten, eine Spielkarte sei nicht die Pik Sieben, aktiviert nicht unbedingt dieselben Hirnregionen wie eine Lüge auf die Frage, ob man den Laden an der Ecke ausgeraubt hat. Die realistischsten Untersuchungen bisher stammen wohl tatsächlich aus der »Lie Lab«-Serie.

Die zwei Firmen, die das Verfahren vermarkten, haben verständlicherweise nicht die Geduld, auf weitere Daten zu warten. Um die gerichtliche Anerkennung seines Verfahrens zu erhalten, bietet Cephos Menschen, die behaupten, fälschlich angeklagt zu sein, kostenlose Scans an.

Die Zulassung von fMRT-Aufnahmen als juristische Beweismittel würde einen Riesenmarkt auftun. »Gut möglich, dass wir viele Anläufe brauchen, bis wir es in den Gerichtssaal schaffen«, räumt Cephos-Chef Steven Laken ein. Zugleich aber versichert er, das Verfahren habe inzwischen eine Genauigkeit von 97 Prozent erreicht. Außerdem hätten nach dem Protokoll seiner Firma erstellte Hirnscans von mehr als 100 Personen Daten geliefert, die viele der von Greenly und Illes aufgelisteten Einwände entkräften.

Dagegen fordern die beiden Wissenschaftler, die Methode für Anwendungen außerhalb der Forschung zu verbieten, bis reguläre klinische Tests dokumentiert haben, dass sie Mindestanforderungen an Sicherheit und Verlässlichkeit genügt.

Vorschläge für die Gestaltung solcher Tests lassen freilich die damit verbundenen Schwierigkeiten erahnen. Neben Menschen wie du und ich sollten auch Schauspieler, Poker-Profis und Soziopathen daran teilnehmen. Überzeugte Anhänger der Methode kämen ebenso unter den Scanner wie Skeptiker. Auch der soziale Kontext wäre zu berücksichtigen. Höflichkeitslügen – »Also das Essen (würg!) war wirklich fantastisch« – müssten mit Prahlereien oder Ausflüchten verglichen werden, um festzustellen, ob das Gehirn in all diesen Fällen identisch reagiert.

Trotzdem hält Greenly strenge Prüfungen für unverzichtbar. »Es besteht doch die Gefahr, dass das Leben von Menschen durch Fehler der Methode ruiniert wird«, warnt er. »Aber auch die Reputation der Wissenschaft kann Schaden nehmen, wenn eine Anwendung des Neuroimagings schiefgeht, die derart im Rampenlicht der Öffentlichkeit steht.«

Auch angesichts der langen kontroversen Geschichte des Polygrafen scheint ein behutsames, schrittweises Vortasten ratsam. Immerhin handelt es sich um ein Prüfinstrument, das ein wesentliches Element sozialer Interaktionen unter die Lupe nimmt. Auch die Frage nach Möglichkeiten des Missbrauchs verdient eine genauere Betrachtung.

Gary Stix ist Redakteur bei »Scientific American«.

Springers Einwürfe

Ehrlich währt am längsten

Aber Wissenschaftler sind auch nur Menschen.

Da hat der Forscher eine originelle Hypothese formuliert, und nun sucht er die experimentelle Bestätigung. Heureka! Schon erfüllt sich seine Hoffnung, die Daten passen zur Erwartung, die Gutachter sind beeindruckt und stimmen einer Veröffentlichung zu.

So einfach geht das selten. Vor allem in den Biowissenschaften ist das Forschungsfeld ungeheuer komplex, viele Faktoren beeinflussen das Resultat. Oft fällen die Daten kein klares Urteil – manche sprechen für die Ausgangshypothese, einige dagegen. Das experimentelle Design muss geändert, die Frage an die Natur so zugespitzt werden, dass ihre Antwort nur Ja lauten kann, notfalls Nein, keinesfalls aber Jein.

Trotz redlicher Mühe gelingen derart lupenreine Erfolge nicht immer. Ein hartnäckig uneindeutiges Resultat weckt die Versuchung, passende Daten zu favorisieren und störende zu verwerfen. Das muss noch lange nicht bewussten Betrug bedeuten. Allein schon der starke Wunsch fördert die Wahrnehmung der »guten« Daten und unterdrückt die »schlechten«, vermeintlich irrelevanten. Doch damit gerät der Forscher in die Grauzone zwischen eindeutiger Verifikation, plausiblem Befund und Datenmanipulation.

In der Regel, das heißt im Rahmen dessen, was der Wissenschaftstheoretiker Thomas Kuhn Normalwissenschaft nannte, fallen solche Datenglättungen gar nicht auf, und die entsprechende Dunkelziffer lässt sich nicht einmal ahnen. Nur wenn die angeblich experimentell untermauerte Hypothese völlig aus dem Rahmen der Normalwissenschaft fällt, schreckt die Forschergilde auf und prüft die Experimente ungläubig nach.

So erging es dem französischen Immunologen Jacques Benveniste, als er 1988 in »Nature« ein Resultat veröffentlichte, das die biochemische Wirkung eines Enzyms bei praktisch unendlicher Verdünnung zu demonstrieren schien. Das wäre auf einen wissenschaftlichen Beweis für die Homöopathie und ihre Behauptung hinausgelaufen, Wasser »erinnere sich«, wenn entsprechend geschüttelt und gerührt, an beliebig darin verdünnte Wirkstoffe. In diesem sensationellen Fall verwandte der damalige Herausgeber von »Nature«, John Maddox, große Mühe auf den Nachweis, dass Benvenistes Team die Daten geschönt hatte. Als Indiz für praktiziertes Wunschdenken der Pariser Forscher wertete er die ungewöhnlich geringe statistische Streuung der Daten. Hochmotivierte Labormitarbeiter gaben daraufhin zu, unerwünschte Befunde als »misslungen« aussortiert zu haben.

Wer weiß, wie oft so etwas – nennen wir es Selbstbetrug durch Wunschdenken – in weniger strittigen Fällen vorkommt. Viel seltener dagegen, aber dennoch erstaunlich oft verüben Wissenschaftler bewussten Betrug: Sie erfinden, fälschen oder plagiieren Daten. Nach einer diskreten Umfrage des Office of Research Integrity (ORI), der amerikanischen Behörde zur Überprüfung wissenschaftlichen Fehlverhaltens, kommen auf 100 Forscher schätzungsweise drei solche Betrugsfälle pro Jahr *(Nature, Bd. 453, S. 980)*.

Die Autoren der Studie finden die Zahl alarmierend, denn sie steht in keinem Verhältnis zu den wenigen Fällen, die zu einer formellen ORI-Untersuchung führen. Ich sehe das anders. Nicht auszudenken, was aus der Forschung würde, wenn jeder Mitarbeiter, der Fehlverhalten eines Kollegen beobachtet, gleich zum Kadi liefe. In der Regel wird das Übel entweder im kleinen Kreis behoben oder stillschweigend übergangen. Dass trotz harter Konkurrenz um knappe Forschungsmittel nicht noch viel öfter manipuliert wird, beruhigt mich. Solange ehrliches Forschen die Regel bleibt, nimmt die Naturerkenntnis zu; denn schwarze Schafe geraten rasch ins Abseits.

Michael Springer

IBM hilft Ihnen, Ihre CO_2-Emissionen zu senken.

WENIGER REDEN. **MACHEN.** Mehr dazu unter ibm.com/green/de

IBM, das IBM Logo und ibm.com sind Marken oder eingetragene Marken der International Business Machines Corporation in den Vereinigten Staaten und/oder anderen Ländern. Andere Namen von Firmen, Produkten und Dienstleistungen können Marken oder eingetragene Marken ihrer jeweiligen Inhaber sein. © 2008 IBM Corporation. Alle Rechte vorbehalten.

O&M IBM L 60/08

Der kosmische Ursprung des Zeitpfeils

Zu den grundlegenden Tatsachen unseres Lebens gehört, dass die Zukunft anders aussieht als die Vergangenheit. Doch unter kosmologischen Gesichtspunkten ist diese Asymmetrie der Zeit vielleicht nur ein lokales Phänomen.

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

In Kürze

- Die physikalischen **Grundgesetze sind zeitsymmetrisch**: Sie gelten gleichermaßen für vorwärts und rückwärts verlaufende Zeit. Doch wir erleben stets nur eine Richtung, von der Vergangenheit in die Zukunft. Warum?
- Der Grund verbirgt sich in der **Vorgeschichte des Universums** – in einer Epoche vor dem Urknall. Vielleicht ist unser Universum Teil eines viel größeren, insgesamt zeitsymmetrischen Multiversums, in dem die Zeit anderswo rückwärtsläuft.

Von Sean M. Carroll

Das Universum sieht irgendwie nicht aus, wie es sollte. Das hört sich seltsam an, wenn man bedenkt, dass die Kosmologen wenig Vergleichsmöglichkeit besitzen. Woher wissen wir, wie das Universum aussehen soll? Dennoch haben wir mit der Zeit ein starkes Gespür dafür entwickelt, was »natürlich« ist – und das uns umgebende Universum wird diesem Anspruch nicht gerecht.

Wohlgemerkt, das kosmologische Standardmodell beschreibt unerhört erfolgreich, woraus das Universum besteht und wie es sich entwickelt. Vor ungefähr 14 Milliarden Jahren war der Kosmos heißer und dichter als das Innere eines Sterns. Seither expandiert das All, kühlt sich ab und verliert an Dichte.

Dieses Modell erklärt zwar praktisch jede bisher gemachte Beobachtung, doch eine Reihe ungewöhnlicher Eigenschaften vor allem des frühen Universums lässt uns vermuten, dass wir die Geschichte noch nicht ganz verstehen.

Eine besonders unnatürliche Eigenschaft des Universums ist die Asymmetrie der Zeit. Die Gesetze der Mikrophysik, die allen Vorgängen im Universum zu Grunde liegen, unterscheiden nicht zwischen Vergangenheit und Zukunft, und trotzdem ist das frühe Universum – heiß, dicht, homogen – völlig verschieden vom heutigen: kühl, verdünnt, klumpig. Es begann geordnet und ist seither immer unordentlicher geworden. Dieser asymmetrische Zeitpfeil, der von der Vergangenheit in die Zukunft weist, spielt in unserem Alltag eine zentrale Rolle. Er ist der Grund, warum wir ein Omelett nicht in ein Ei verwandeln können, warum sich in einem Glas lauwarmen Wassers nicht spontan Eiswürfel bilden, und warum wir uns an die Vergangenheit erinnern, nicht aber an die Zukunft. Der Ursprung dieser Asymmetrie lässt sich bis zur Ordnung des Universums kurz nach dem Urknall zurückverfolgen. Jedes Mal, wenn man ein Ei aufschlägt, betreibt man beobachtende Kosmologie.

Der Zeitpfeil ist wohl das krasseste Beispiel für ein universelles Merkmal, das die Kosmologen derzeit überhaupt nicht zu erklären ver-

KENN BROWN

In unserem Universum verläuft die Zeit – symbolisiert durch die Sanduhr – von einem hochgeordneten Anfangszustand zu immer weniger geordneten Zuständen. In anderen Teilen eines hypothetischen Multiversums könnte die Zeitrichtung umgekehrt sein.

HÄUFIGE FRAGEN, ERSTER TEIL

Wenn die Entropie immerfort wächst, wie können dann überhaupt Gegenstände niedriger Entropie – beispielsweise Eier – entstehen?
Das Gesetz der Entropie bezieht sich auf geschlossene Systeme. Es schließt eine Verringerung der Entropie in einem offenen System nicht aus. Ein Huhn nimmt Energie auf und unternimmt große Anstrengungen, um ein Ei hervorzubringen.

Haben einige Teilchenprozesse nicht ihren eigenen Zeitpfeil?
Seltene Elementarteilchen wie die neutralen Kaonen zerfallen ein wenig öfter in einer Zeitrichtung als in der anderen. Auf diese Verletzung der Zeitsymmetrie schließen die Physiker aus der Beobachtung gewisser Teilcheneigenschaften. Doch im Gegensatz zum Wachstum der Entropie sind solche Zerfallsprozesse reversibel. Aus dem Standardmodell der Teilchenphysik lässt sich keine Erklärung für die niedrige Entropie des frühen Universums gewinnen.

mögen. Doch dieses Geheimnis des beobachtbaren Universums verweist immer deutlicher auf die Existenz einer viel größeren Raumzeit, die sich unserer Beobachtung entzieht. Es stützt die These, dass wir Teil eines Multiversums sind, aus dessen Dynamik die scheinbar unnatürlichen Eigenschaften unserer Nachbarschaft hervorgehen.

Für Physiker steckt die Zeitasymmetrie im berühmten zweiten Hauptsatz der Thermodynamik: In einem abgeschlossenen System nimmt die Entropie niemals ab. Grob gesagt ist die Entropie ein Maß für die Unordnung eines Systems. Im 19. Jahrhundert erklärte der österreichische Physiker Ludwig Boltzmann die Entropie, indem er den makroskopischen Zustand eines Objekts von dessen mikroskopischen Zuständen unterschied. Eine Tasse Kaffee lässt sich zunächst durch ihren Makrozustand beschreiben, mit allgemeinen Eigenschaften wie Temperatur und Druck. Der Mikrozustand spezifiziert hingegen exakt Ort und Geschwindigkeit jedes einzelnen Atoms in der Flüssigkeit. Zu einem speziellen Makrozustand gehören viele unterschiedliche Mikrozustände: Wir könnten hier und da ein Atom verschieben, ohne dass ein Beobachter des Makrozustands den Unterschied bemerken würde.

Das Rätsel der Entropie

Die Entropie ist nach Boltzmann die Anzahl der unterschiedlichen Mikrozustände, die ein und demselben Makrostatus entsprechen; genauer gesagt ist sie der Logarithmus dieser Zahl. Demnach gibt es mehr Möglichkeiten, aus einer bestimmten Anzahl von Atomen eine Konfiguration mit hoher Entropie zu bilden als eine mit niedriger Entropie. Angenommen, wir gießen Milch in den Kaffee. Die einzelnen Moleküle lassen sich auf sehr viele Arten zu einem homogenen Gemisch aus Milch und Kaffee anordnen, aber nur auf relativ wenige Arten so, dass die Milch vom sie umgebenden Kaffee säuberlich getrennt bleibt. Gut umgerührter Milchkaffee hat also höhere Entropie als Caffè Latte.

So gesehen überrascht es nicht, dass die Entropie die Tendenz hat, mit der Zeit zu wachsen. Da Zustände hoher Entropie viel zahlreicher sind als solche mit niedriger, wird fast jede Veränderung des Systems einfach aus Gründen der Wahrscheinlichkeit seine Entropie erhöhen. Deshalb vermischt sich Milch allmählich mit Kaffee, entmischt sich aber niemals ganz von selbst. Zwar ist es physikalisch nicht unmöglich, dass sämtliche Milchmoleküle sich spontan direkt beieinander anordnen, doch statistisch gesehen ist das extrem unwahrscheinlich. Bis ein totaler Entmischungszustand von selbst durch zufälliges Umsortieren der Moleküle eintritt, muss man viel länger warten, als das beobachtbare Universum existiert. Der Zeitpfeil ist nichts anderes als die Tendenz von Systemen, sich zu einem der zahlreichen natürlichen Zustände mit hoher Entropie zu entwickeln.

Die Erklärung für den Trend einzelner Zustände zu höherer Entropie erklärt aber noch nicht, warum die Entropie in unserem Universum zunimmt. Die Frage bleibt: Warum war die Entropie anfangs niedrig? Das erscheint sehr unnatürlich angesichts der Tatsache, dass Zustände niedriger Entropie so selten sind. Selbst wenn man unterstellt, dass unser Universum heute mittlere Entropie hat, erklärt das nicht, warum die Entropie früher noch niedriger war. Von allen möglichen Anfangsbedingungen, aus denen ein Universum wie das unsere hervorgehen könnte, haben die allermeisten weit höhere Entropie, nicht niedrigere.

Mit anderen Worten, die große Frage ist nicht, warum die Entropie des Universums morgen höher sein wird als heute, sondern wieso die Entropie gestern niedriger war und vorgestern noch niedriger. Wir können diese Überlegung bis zum Ursprung des für uns beobachtbaren Universums zurückverfolgen. Letztlich ist die Asymmetrie der Zeit ein Problem, das die Kosmologie lösen muss.

Das frühe Universum war in einem höchst ungewöhnlichen Zustand. Alle Teilchen, aus denen das unserer Beobachtung zugängliche All heute besteht, drängten sich in einem extrem heißen und dichten Volumen zusammen. Vor allem waren sie in diesem winzigen Volumen fast gleichförmig verteilt. Im Mittel schwankte die Dichte von Ort zu Ort nur um ein Hunderttausendstel. Im Lauf der Expansion und Abkühlung des Universums verstärkte die Gravitationsanziehung allmählich diese Unterschiede. Regionen, die ein paar Teilchen mehr enthielten, bildeten Sterne und Galaxien, während aus Gebieten mit etwas weniger Teilchen intergalaktische Leerräume entstanden.

Offensichtlich prägt die Schwerkraft die Evolution des Universums in entscheidender Weise. Leider verstehen wir die Entropie nicht ganz, sobald die Gravitation ins Spiel kommt. Die Schwerkraft entsteht aus der Form der Raumzeit, aber eine umfassende Theorie der Raumzeit wird erst aus einer künftigen Quantentheorie der Gravitation hervorgehen. Zwar können wir die Entropie einer Flüssigkeit mit dem Verhalten ihrer Moleküle in Zusammenhang setzen, aber da wir im Grunde nicht wissen, wie der Raum beschaffen ist, wissen wir auch nicht, wie die Mikrozustände der Gravitation mit einem bestimmten Makrozustand zusammenhängen.

Immerhin können wir uns ungefähr vorstellen, wie die Entropie sich entwickelt. In Situationen, in denen die Schwerkraft vernachlässigt werden kann – wie bei der Tasse Milchkaffee –, hat eine gleichförmige Partikelverteilung hohe Entropie. Dieser Zustand ist im Gleichgewicht: Selbst wenn Teilchen sich umgruppieren, sind sie doch schon so stark vermischt, dass sich makroskopisch betrachtet nichts ändert. Doch sobald die Schwerkraft ins Spiel kommt und das Volumen konstant gehalten wird, besitzt eine gleichmäßige Verteilung relativ niedrige Entropie. In diesem Fall hält sich das System weit entfernt vom Gleichgewicht auf. Die Gravitation klumpt die Teilchen zu Sternen und Galaxien zusammen, und die Entropie nimmt – in Übereinstimmung mit dem zweiten Hauptsatz – deutlich zu.

Wenn Schwarze Löcher verdampfen

Tatsächlich wissen wir, was entsteht, wenn wir die Entropie eines – genügend großen – Volumens unter Schwerkrafteinfluss maximieren: ein Schwarzes Loch. In den 1970er Jahren bestätigte Stephen Hawking von der University of Cambridge eine provokante These von Jacob Bekenstein, der jetzt an der Hebrew University of Jerusalem lehrt; demnach gehorchen auch Schwarze Löcher dem zweiten Hauptsatz. Wie die heißen Objekte, für deren Beschreibung dieses thermodynamische Grundgesetz ursprünglich formuliert wurde, emittieren Schwarze Löcher Strahlung und haben Entropie – und zwar eine ganze Menge.

Ein einziges Schwarzes Loch mit einer Million Sonnenmassen wie jenes, das im Zentrum unserer Galaxis sitzt, hat 100-mal so viel Entropie wie alle gewöhnlichen Teilchen im beobachtbaren Universum. Letzten Endes verdampfen sogar Schwarze Löcher, indem sie Hawkingstrahlung emittieren. Ein Schwarzes Loch besitzt noch nicht höchstmögliche Entropie – nur die maximale Entropie, die sich in ein bestimmtes Volumen packen lässt. Doch das Volumen des Universums wächst anscheinend unbegrenzt. 1998 entdeckten Astronomen, dass die kosmische Expansion sich beschleunigt.

Die einfachste Erklärung ist die Existenz einer so genannten Dunklen Energie, die den leeren Raum erfüllt und sich mit der Expansion des Universums anscheinend nicht abschwächt. Das ist zwar nicht die einzige, aber die derzeit favorisierte Erklärung für die kosmische Beschleunigung.

Wenn die Dunkle Energie sich nicht verflüchtigt, wird das Universum immerfort expandieren. Ferne Galaxien werden aus dem astronomischen Blickfeld verschwinden (siehe »Das kosmische Vergessen« von Lawrence M. Krauss und Robert J. Scherrer, Spektrum der Wissenschaft 5/2008, S. 24). Die übrigen werden zu Schwarzen Löchern kollabieren,

Leider verstehen wir die Entropie nicht ganz, sobald die Schwerkraft ins Spiel kommt

Entropie in der Küche

Ein rohes Ei verdeutlicht die Asymmetrie der Zeit: Es bricht leicht, aber wenn es einmal zerschlagen ist, fügt es sich nicht von selbst wieder zusammen. Der simple Grund ist, dass es für ein rohes Ei viel mehr Varianten gibt, zu zerbrechen, als ganz zu bleiben. In der Sprache der Physik hat das zerbrochene Ei eine höhere Entropie.

ALLE EIER: GETTY IMAGES; GANZES EI: RICHARD DRURY; EI MIT KL. SPRUNG: GRAEME MONTGOMERY; EI MIT LANGEM SPRUNG: JAN STROMME; HALBIERTES EI: MICHAEL ROSENFELD; EI MIT AUSLAUFENDEM DOTTER UND VÖLLIG ZERBROCHENES EI: JONATHAN KANTOR; EIGELB MIT SCHALENHÄLFTEN: DIAMOND SKY IMAGES

HÄUFIGE FRAGEN, ZWEITER TEIL

Enthält die Quantenmechanik keinen Zeitpfeil?
Nach der gängigsten Deutung führt die Messung eines Quantensystems zum Kollaps seiner Wellenfunktion, und dieser Vorgang ist nicht zeitsymmetrisch. Kollabierte Wellenfunktionen »entkollabieren« nicht wieder zu Quantensuperpositionen. Das hat aber denselben Grund wie beim irreversibel zerbrochenen Ei: Der Kollaps erhöht die Entropie des Universums. Die Quantenmechanik liefert keine Erklärung für die ursprünglich niedrige Entropie.

Warum erinnern wir uns an die Vergangenheit, aber nicht an die Zukunft?
Ein zuverlässiges Gedächtnis erfordert eine geordnete Vergangenheit – das heißt, niedrige Entropie. Bei hoher Entropie wären alle vermeintlichen Erinnerungen nur zufällige Fluktuationen, die mit wirklichen Ereignissen nichts gemein hätten.

die ihrerseits in das umgebende Dunkel verdampfen wie Pfützen an einem heißen Tag. Übrig bleibt ein praktisch leeres Universum. Dann und nur dann wird das Universum wirklich das Maximum seiner Entropie erreicht haben; es wird im Gleichgewicht sein und sich nicht mehr verändern.

Es mag seltsam anmuten, dass der leere Raum derart riesige Entropie besitzt – als wäre ein völlig leerer Schreibtisch der unordentlichste der Welt. Die Entropie erfordert Mikrozustände, und auf den ersten Blick hat der leere Raum keine. Doch in Wirklichkeit enthält der leere Raum unzählige Zustände: die mikroskopischen Quantengravitationszustände der Raumstruktur. Wir wissen weder, wie sie genau beschaffen sind, noch, welche Mikrozustände die Entropie eines Schwarzen Lochs ausmachen. Aber wir wissen, dass in einem beschleunigt expandierenden Universum die Entropie des beobachtbaren Volumens gegen einen konstanten Wert strebt, der proportional zur Größe seiner Grenzfläche ist. Dieser wahrlich enorme Entropiebetrag übersteigt bei Weitem die Entropie der Materie innerhalb dieses Volumens.

Am auffälligsten an dieser Geschichte ist der deutliche Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft. Das Universum beginnt in einem Zustand sehr niedriger Entropie: gleichmäßig dicht gepackte Teilchen. Es durchmisst einen Zustand mittlerer Entropie: die klumpige Verteilung von Sternen und Galaxien, die wir heute rund um uns sehen. Schließlich erreicht es einen Zustand hoher Entropie: fast leerer Raum, in dem nur da und dort ein Teilchen mit niedriger Energie vorkommt.

Warum sind Vergangenheit und Zukunft so verschieden? Es genügt nicht, einfach eine Theorie der Anfangsbedingungen aufzustellen und damit zu begründen, warum das Universum mit niedriger Entropie begann. Wie der Philosoph Huw Price von der University of Sydney (Australien) betont hat, sollte jede Überlegung, die für die Anfangsbedingungen gilt, auch für die Endbedingungen gelten; sonst würden wir irrtümlich voraussetzen, was wir beweisen wollen – dass die Vergangenheit etwas Besonderes war. Entweder müssen wir die grundlegende Asymmetrie der Zeit schlicht als unerklärliche Eigenschaft des Universums hinnehmen, oder wir müssen tiefer in die wechselhafte Geschichte von Raum und Zeit eindringen.

Viele Kosmologen haben versucht, die Asymmetrie auf die kosmische Inflation zurückzuführen. Die Inflation liefert für viele grundlegende Merkmale des Universums eine attraktive Erklärung. Dieser Idee zufolge war das sehr frühe Universum – oder zumindest ein Teil davon – nicht von Teilchen erfüllt, sondern von einer vorübergehenden Form Dunkler Energie, deren Dichte unermesslich höher war als heute. Diese Energie trieb die Expansion des Universums mit fantastischer Beschleunigung an; danach zerfiel sie in Materie und Strahlung und hinterließ jenen winzigen Rest Dunkler Energie, der gegenwärtig wieder beschleunigend wirkt. Darauf folgt einfach die übrige Geschichte des Urknalls, vom gleichförmigen primordialen Gas zu Galaxien und so fort.

Ursprünglich sollte die Inflation eine plausible Erklärung für die Feinabstimmung der Bedingungen im frühen Universum liefern, insbesondere für die bemerkenswert gleichförmige Dichte der Materie in weit voneinander getrennten Regionen. Die von der zeitweilig enormen Dunklen Energie angetriebene Beschleunigung glättet fast alle Unregelmäßigkeiten. Die vorhergehende Verteilung von Materie und Energie wird bedeutungslos; sobald die Inflation einsetzt, entfernt sie alle Spuren der vorherigen Bedingungen. Zurück bleibt ein frühes Universum, das heiß, dicht und gleichförmig ist.

Inflation ist kein Zufall

Das Inflationsmodell erweist sich in vieler Hinsicht als sehr erfolgreich. Seine Vorhersage leichter Abweichungen von der perfekten Gleichförmigkeit stimmt mit beobachteten Dichteunterschieden im Universum überein. Doch als Erklärung für die Asymmetrie der Zeit kommt es Forschern wie Roger Penrose von der University of Oxford eher wie ein fauler Trick vor. Damit der Prozess wie gewünscht funktioniert, muss die ultradichte Dunkle Energie in einer sehr speziellen Konfiguration beginnen. Tatsächlich sollte ihre Entropie um einen fantastischen Betrag kleiner sein als die Entropie des heißen, dichten Gases, in das sie zerfällt. Das bedeutet, die Inflation erklärt eigentlich nichts. Sie »erklärt« einen Zustand ungewöhnlich niedriger Entropie – ein heißes, dichtes, gleichförmiges Gas –, indem sie einen vorhergehenden Zustand noch geringerer Entropie beschwört: ein glattes Stück Raum, in dem ultradichte Dunkle Energie vorherrscht. Das verschiebt das Rätsel nur eine Stufe zurück: Warum kam es überhaupt zur Inflation?

Ein Grund, warum viele Kosmologen die Inflation zur Erklärung für die Zeitasymmetrie heranziehen, ist, dass die anfängliche Konfiguration der Dunklen Energie gar nicht so unwahrscheinlich aussieht. Zur Zeit der Inflation war unser beobachtbares Universum weniger als einen Zentimeter groß. Da ein derart winziges Gebiet vermeintlich nicht

viele Mikrozustände hat, erscheint es gar nicht so unwahrscheinlich, dass das Universum zufällig in den Mikrozustand gerät, welcher der Inflation entspricht.

Leider ist diese Meinung falsch. Selbst wenn das frühe Universum nur einen Zentimeter misst, birgt es genau dieselbe Anzahl von Mikrozuständen wie das gesamte heute beobachtbare Universum. Nach den Regeln der Quantenmechanik ändert sich die Gesamtzahl der Mikrozustände in einem System niemals. Die Entropie wächst nicht, weil die Anzahl der Mikrozustände zunimmt, sondern weil das System zum wahrscheinlichsten Makrostatus tendiert. Tatsächlich ist das frühe Universum dasselbe physikalische System wie das späte; immerhin geht das eine aus dem anderen hervor.

Unter all den verschiedenen Möglichkeiten, die den Mikrozuständen des Universums offenstehen, entspricht nur ein unglaublich winziger Bruchteil einer gleichmäßigen Konfiguration ultradichter Dunkler Energie in einem winzigen Volumen. Die Bedingungen für den Beginn der Inflation sind extrem speziell und beschreiben deshalb eine Konfiguration mit sehr niedriger Entropie. In einer zufälligen Auswahl unter den Konfigurationen des Universums stößt man nur mit äußerst geringer Wahrscheinlichkeit auf die richtigen Anfangsbedingungen für Inflation. Die Inflation an sich erklärt nicht, warum das frühe Universum geringe Entropie besitzt; das wird einfach vorausgesetzt.

Somit hilft uns auch die Inflation nicht, den Unterschied zwischen Vergangenheit und

Wie Gravitation die Entropie beeinflusst

Ob die Entropie hoch oder niedrig anzusetzen ist, hängt von der Situation ab. Je nachdem, wie ein System sich zeitlich entwickelt, weisen die Physiker einem bestimmten Zustand hohe Entropie zu. Wenn ein dünnes und genügend kaltes Gas dem Zug der Schwerkraft folgt, entwickelt es sich zu einem Gasklumpen. Aus dem Gesetz der Entropiezunahme folgt dann, dass der Klumpen hohe Entropie hat, obwohl er auf den ersten Blick geordnet aussieht, das heißt scheinbar niedrige Entropie aufweist.

NIEDRIGE ENTROPIE — HOHE ENTROPIE

• ohne Gravitation
• konstantes Volumen
Bei vernachlässigbarer Schwerkraft hat ein in einem Kasten eingeschlossenes Gas niedrige Entropie, wenn es in einer Ecke konzentriert ist, und hohe Entropie, wenn es sich verteilt. Also verteilt es sich.

• mit Gravitation
• konstantes Volumen
Unter Schwerkrafteinfluss gilt das Gegenteil: Das Gas erreicht maximale Entropie, wenn es zu einem Schwarzen Loch kollabiert. Somit klumpt ein Gas unter Einfluss seiner Schwerkraft zusammen, statt sich auszubreiten. Das Loch kann im Gleichgewicht mit seiner Umgebung ewig überdauern.

• mit Gravitation
• expandierendes Volumen
Wenn der Kasten sich ausdehnt, klumpt das Gas anfänglich zusammen und bildet ein Schwarzes Loch, doch dann verdampft das Loch. Das hinterlassene Gas erhöht seine Entropie weiter, indem es sich zu einem immer dünneren Partikelbrei verteilt.

LUCY READING-IKKANDA

HÄUFIGE FRAGEN, DRITTER TEIL

Ist die Multiversumtheorie überprüfbar?
Die Idee, dass das Universum weit über den beobachtbaren Bereich hinausreicht, ist eigentlich keine Theorie, sondern eine Vorhersage auf Grund bestimmter Theorien der Quanten- und Gravitationsphysik. Freilich ist die Vorhersage schwer zu überprüfen. Andererseits zwingen uns alle physikalischen Theorien, die Grenzen der unmittelbaren Anschauung zu überschreiten. Zum Beispiel wirft das derzeit beste Modell für die Entstehung der kosmischen Struktur, das Inflationsszenario, die Frage auf, welche Bedingungen vor Beginn der Inflationsphase herrschten.

Zukunft zu erklären. Darum versuchen wir es einfach mit folgender kühner Behauptung: Die allerfernste Vergangenheit unterscheidet sich eigentlich nicht von der Zukunft. Vielleicht ist die ferne Vergangenheit ebenso wie die Zukunft in Wahrheit ein Zustand hoher Entropie. Dann wäre der heiße, dichte Zustand, den wir »frühes Universum« genannt haben, gar nicht der echte Ursprung des Universums, sondern nur ein Zwischenstadium seiner Geschichte.

Einige Kosmologen stellen sich vor, dass das Universum einen »Rückprall« *(bounce)* durchgemacht hat. Vor diesem Ereignis zog sich der Raum zusammen, kollabierte aber nicht einfach zu einem Punkt unendlicher Dichte. Stattdessen kam irgendeine neuartige Physik ins Spiel – Quantengravitation, Extradimensionen, Stringtheorie oder andere exotische Phänomene – und verhinderte im allerletzten Moment den endgültigen Kollaps. Das Universum prallte quasi vor dem Zermalmen zurück und begann scheinbar von vorn mit dem, was wir Urknall nennen. Prallkosmologien sind zwar faszinierend, erklären aber nicht den Zeitpfeil. Entweder nahm die Entropie zu, als das vorherige Universum sich dem Zermalmen näherte; in diesem Fall erstreckt sich der Zeitpfeil unendlich weit in die Vergangenheit. Oder die Entropie nahm vor dem Zermalmen ab; daraus folgt ein unnatürlicher Zustand niedriger Entropie mitten in der Geschichte des Universums, zum Zeitpunkt des Rückpralls. In beiden Fällen landen wir wieder bei der Frage, warum die Entropie zur Zeit des so genannten Urknalls klein war.

Nehmen wir stattdessen einmal an, das Universum habe mit hoher Entropie begonnen – das heißt, in seinem natürlichsten Zustand. Ein guter Kandidat dafür ist der leere Raum. Wie jeder Zustand hoher Entropie neigt der leere Raum dazu, einfach da zu sein, ohne sich zu verändern. Das Problem ist jetzt: Wie bringen wir diese trostlos dahinvegetierende Raumzeit dazu, unser gegenwärtiges Universum hervorzubringen? Die Lösung steckt vielleicht in der Existenz der Dunklen Energie.

Wie ein Babyuniversum entsteht

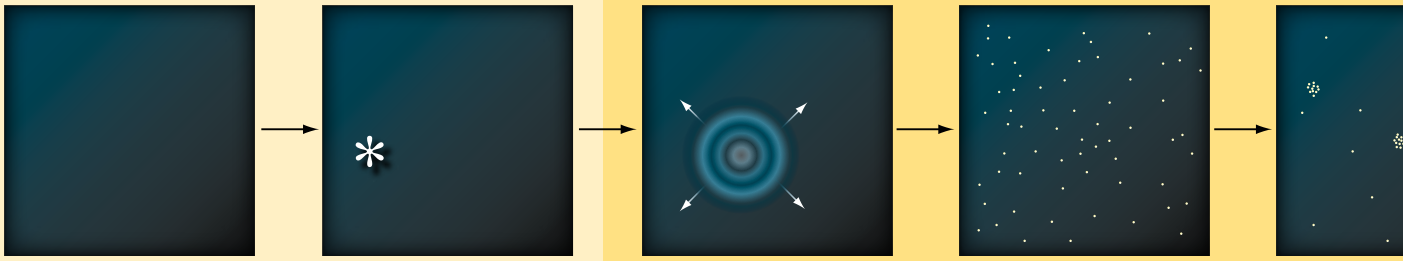
Mit Dunkler Energie ist der leere Raum nicht vollständig leer. Fluktuationen von Quantenfeldern verursachen eine sehr niedrige Temperatur – sehr viel tiefer als die des heutigen Alls, aber nicht ganz am absoluten Nullpunkt. In einem solchen Universum treten bei allen Quantenfeldern gelegentlich thermische Fluktuationen auf; das heißt, es vegetiert nicht absolut regungslos dahin. Wenn wir lange genug warten, werden einzelne Teilchen oder sogar nennenswerte Partikelmengen wie aus dem Nichts auftauchen und sich wieder ins Vakuum verflüchtigen. Dabei handelt es sich – im Unterschied zu den kurzlebigen »virtuellen« Teilchen, die der leere Raum sogar ohne Dunkle Energie enthält – um reale Teilchen.

Unter anderem können durch solche Fluktuationen auch kleine Flecken ultradichter Dunkler Energie entstehen. Bei geeigneten Bedingungen kann das Fleckchen inflationär expandieren, sich abschnüren und ein separates, eigenständiges Babyuniversum bilden.

Oberflächlich betrachtet ähnelt dieses Szenario dem Standardschema der Inflation. Auch dort postulieren wir, dass zufällig ein Fleck ultradichter Dunkler Energie entsteht, der die Inflation auslöst. Der Unterschied be-

EINE KOSMOLOGISCHE SYMMETRIE DER ZEIT

Nach dem Standardmodell der Kosmologie begann das Universum als nahezu gleichförmiges Gas und wird als fast leerer Raum enden. Es entwickelt sich von niedriger zu hoher Entropie – bis zum so genannten Wärmetod. Doch dieses Modell vermag nicht zu erklären, wodurch der anfängliche Zustand niedriger Entropie zu Stande kam. Das Modell des Autors fügt eine kosmologische Vor-



Der Raum ist fast leer.

Die Quantenfelder einer Region fluktuieren.

Der Raum dehnt sich inflationär aus.

Die Inflation endet und erfüllt den Raum mit einem fast gleichförmigen primordialen Gas.

Aus Gasklumpen bilden sich Galaxien.

RETROCHRONOLOGIE

Die Geschichte des beobachtbaren Universums

Gemäß dem kosmologischen Kenntnisstand lassen sich die wichtigsten Ereignisse in der Geschichte unseres Universums in folgender Reihenfolge erzählen:

- **Der Raum ist leer** – bis auf eine winzige Menge an Vakuumenergie und niederenergetischen Teilchen, die gelegentlich durch Quantenfluktuationen entstehen.
- Plötzlich fällt aus den Tiefen des Universums von überall **intensive Strahlung** ein. Sie fokussiert sich auf einen Punkt im Raum und bildet dort ein »Weißes Loch«.
- **Das Weiße Loch wächst** allmählich auf das Milliardenfache der Sonnenmasse, indem es zusätzlich Strahlung abnehmender Temperatur aufnimmt.
- **Andere Weiße Löcher**, die anfangs Milliarden Lichtjahre entfernt waren, nähern sich. Sie bewegen sich langsam aufeinander zu und bilden eine homogene Verteilung.
- Die Weißen Löcher **verlieren Masse**, indem sie Gas, Staub und Strahlung in die Umgebung abgeben.
- **Gas und Staub implodieren** gelegentlich und bilden Sterne. Diese verteilen sich zu Galaxien rund um die Weißen Löcher.
- Wie zuvor die Weißen Löcher empfangen diese Sterne **nach innen gerichtete Strahlung**. Mit der Energie dieser Strahlung wandeln sie schwere Elemente in leichtere um.
- **Die Sterne lösen sich in Gas auf**, das sich allmählich gleichmäßig im Raum verteilt; die gesamte Materie zieht sich zusammen und wird dichter.
- **Das Universum wird immer heißer** und kompakter; schließlich schrumpft es völlig zusammen und endet im großen Zermalmen.

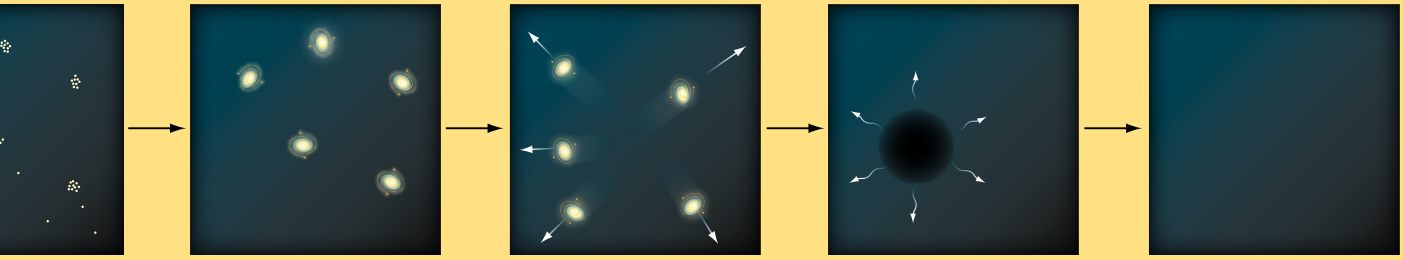
Offensichtlich wird die Geschichte des Universums normalerweise anders erzählt – hier haben wir die gewohnte Abfolge der Ereignisse umgekehrt. Doch da die Grundgesetze der Physik in beiden Zeitrichtungen gelten, ist diese Abfolge genauso legitim wie die übliche. Die Verfremdung soll verdeutlichen, wie unwahrscheinlich die ganze Geschichte unseres Universums eigentlich ist.

DON DIXON

steht in der Art der Anfangsbedingungen. Im Standardszenario entsteht der Fleck in einem heftig fluktuierenden Universum, in dem fast alle Fluktuationen nichts hervorbringen, was auch nur entfernt einem Inflationsprozess ähnelt. Viel wahrscheinlicher wäre, dass das Universum die Inflationsphase einfach auslässt und direkt in einen heißen Urknall fluktuiert. Soweit es die Entropie betrifft, sollte das Universum noch wahrscheinlicher gleich in seine heutige Konfiguration fluktuieren und die vergangenen 14 Milliarden Jahre kosmischer Evolution komplett überspringen.

In unserem neuen Szenario hat das zuvor existierende Universum niemals zufällig fluktuiert. In jener Vorzeit herrschte ein sehr spezi-

geschichte hinzu. Das Universum begann leer und wird leer enden. Das Auftauchen von Sternen und Galaxien ist eine vorübergehende Abweichung vom normalen Gleichgewichtszustand. Die Darstellung der kosmischen Geschichte, die unten durch eine Folge einzelner Standbilder veranschaulicht wird, ist schematisch: Sie zeigt nicht, dass der Raum insgesamt expandiert.



Das heutige Universum

Die beschleunigte Expansion entfernt die Galaxien aus dem beobachtbaren Universum.

Jede Galaxie kollabiert zu einem Schwarzen Loch, das zu einem dünnen Gas verdampft.

Der Raum ist fast leer.

LUCY READING-IKKANDA

eller Zustand – leerer Raum. Diese Theorie enthält eine derzeit noch unbewiesene Behauptung: Der wahrscheinlichste Vorgang, der aus jenem vorherigen Zustand ein Universum wie das unsrige hervorbringt, ist nicht irgendeine Fluktuation, sondern durchläuft eine Periode der Inflation. Mit anderen Worten, unser Universum ist zwar eine Fluktuation, aber keine zufällige.

Erinnerungen an die Zukunft

Dieses Szenario, das Jennifer Chen von der University of Chicago (Illinois) und ich 2004 vorschlugen, liefert eine originelle Erklärung für den Ursprung der Zeitasymmetrie in unserem Universum: Wir sehen nur einen winzigen Ausschnitt des großen Ganzen, und diese Gesamtheit ist völlig zeitsymmetrisch. Die Entropie kann durch die Erzeugung neuer Babyuniversen unbegrenzt wachsen.

Diese Geschichte hat den Vorteil, dass sie sich zeitlich vorwärts und rückwärts erzählen lässt. Angenommen, wir beginnen zu einem bestimmten Zeitpunkt mit dem leeren Raum und beobachten, wie er sich in die Zukunft und die Vergangenheit entwickelt. Beides geht, denn wir setzen keinen einseitig gerichteten Zeitpfeil voraus. In beiden Zeitrichtungen tauchen durch Fluktuation Babyuniversen auf, entleeren sich und setzen ihrerseits Babys in die Welt. In extrem großem Maßstab sieht ein solches Multiversum im Mittel zeitsymmetrisch aus – sowohl in der Vergangenheit wie in der Zukunft entstehen neue Universen und pflanzen sich unbegrenzt fort. Zu jedem von ihnen gehört ein Zeitpfeil, doch in der Hälfte aller Fälle weist er in die zu den übrigen entgegengesetzte Richtung.

Die Vorstellung eines Universums mit rückwärts gerichtetem Zeitpfeil wirkt verwirrend. Angenommen, wir begegnen Wesen aus einer solchen Welt: Erinnern sie sich an die Zukunft? Zum Glück besteht die Gefahr eines solchen Zusammentreffens nicht. Gemäß dem hier beschriebenen Szenario liegen die Orte, an denen die Zeit rückwärtszulaufen scheint, unermesslich weit in unserer Vergangenheit – lange vor unserem Urknall. Dazwischen erstreckt sich ein weites Universum, in dem die Zeit scheinbar überhaupt nicht vergeht; es gibt fast keine Materie, und die Entropie verändert sich nicht. Etwaige Wesen, die in einer dieser zeitverkehrten Regionen lebten, würden nicht alt zur Welt kommen und jung sterben, oder was es sonst an Skurrilem geben mag. Auch für sie würde die Zeit auf ganz gewöhnliche Weise vergehen. Nur wenn wir ihr Universum mit unserem vergleichen, scheint etwas nicht zu stimmen – unsere Vergangenheit ist ihre Zukunft und umgekehrt. Doch solch ein Vergleich ist rein hypothetisch, denn wir können nicht zu ihnen gelangen und sie nicht zu uns.

Gegenwärtig ist über unser Modell das letzte Wort nicht gesprochen. Kosmologen denken seit vielen Jahren über die Möglichkeit von Babyuniversen nach, aber wir verstehen den Geburtsvorgang nicht. Falls Quantenfluktuationen neue Universen zu schaffen vermögen, können sie auch viele andere Dinge hervorbringen – zum Beispiel eine ganze Galaxie. Wenn unser Szenario das Universum erklären soll, muss es vorhersagen, dass die meisten Galaxien im Gefolge urknallähnlicher Ereignisse entstehen und nicht als einsame Fluktuationen in einem sonst leeren All. Andernfalls erschiene unser Universum höchst unnatürlich.

Aber letztlich geht es nicht um dieses oder jenes Modell für die Struktur der Raumzeit in größtem Maßstab. Wirklich faszinierend ist die Idee, dass eine auffällige Eigenart unseres Universums – der Zeitpfeil als Folge der niedrigen Entropie im frühen Universum – Auskunft über das Wesen des nicht beobachtbaren Universums zu geben vermag.

Wie anfangs erwähnt ist es zwar erfreulich, wenn ein Modell den Daten entspricht, aber die Kosmologen wollen mehr: Wir möchten die Naturgesetze und unser spezielles Universum so verstehen, dass alles darin einen Sinn ergibt. Wir wollen die seltsamen Eigenschaften unseres Universums nicht einfach als nackte Tatsachen hinnehmen. Die Zeitasymmetrie des beobachtbaren Kosmos scheint auf etwas Tieferes hinzuweisen – auf das grundlegende Zusammenwirken von Raum und Zeit. Unsere Aufgabe als Physiker ist, aus solchen Indizien ein schlüssiges Bild zusammenzusetzen.

Wäre das beobachtbare Universum alles, was überhaupt existiert, dann gäbe es kaum eine natürliche Erklärung für den Zeitpfeil. Doch wenn das uns umgebende All nur der winzige Ausschnitt in einem weit größeren Bild ist, eröffnen sich neue Möglichkeiten. Wir können uns unser Universum als Teil eines Puzzles vorstellen, eines größeren Systems, das seine Entropie in tiefer Vergangenheit und ferner Zukunft unbegrenzt steigert. Um den Physiker Edward Tryon zu zitieren: Unser Universum ist einfach eines der Dinge, die sich von Zeit zu Zeit ereignen.

Andere Forscher arbeiten an verwandten Ideen, denn immer mehr Kosmologen nehmen das Problem des Zeitpfeils ernst. Es ist kinderleicht, den Pfeil zu beobachten; ein wenig Milch im Kaffee genügt schon. Doch dieser scheinbar simple Vorgang führt zurück bis zum Beginn unseres Universums – und vielleicht noch weit darüber hinaus. ◁

Sean M. Carroll ist als Physiker am California Institute of Technology tätig. Er forscht auf den Gebieten Kosmologie, Teilchenphysik und allgemeine Relativitätstheorie, mit dem Schwerpunkt Dunkle Energie. Für seine Forschungs- und Lehrtätigkeit wurde er mehrfach ausgezeichnet, unter anderem mit dem Graduate Student Council Teaching Award des Massachusetts Institute of Technology. Außerdem hat er sich durch seine Beiträge zum Weblog »Cosmic Variance« einen Namen gemacht.

Carroll, S. M.: Dark Energy and the Preposterous Universe. In: Sky and Telescope 109(3), S. 32–39, 2005.

Carroll, S. M., Chen, J.: Spontaneous Inflation and the Origin of the Arrow of Time. Eingereicht am 27. Oktober 2004. arxiv.org/abs/hep-th/0410270

Price, H.: Time's Arrow and Archimedes' Point: New Directions for the Physics of Time. Oxford University Press, 1996.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/960471.

Radioaktive Bestrahlung konserviert Lebensmittel

»Auf dem Sektor der Lebensmittelindustrie hat sich die Aufmerksamkeit auf die Möglichkeit gerichtet, ionisierte Strahlung zur Nahrungsmittelkonservierung zu gebrauchen. Die Anwendung basiert auf ihrer Eigenschaft, Mikroorganismen und Insekten abzutöten. … In geeigneter Verpackung (um Neuinfektionen zu vermeiden) wird durch Bestrahlung die Lebensdauer gelagerter Lebensmittel beachtlich verlängert. … Größte Aussichten bieten sich für die Fleischkonservierung und andere teure Produkte, und die Möglichkeit zur Herstellung neuer Typen von Konserven.« *Naturwissenschaftliche Rundschau, Nr. 8, August 1958, 11. Jg., S. 318*

Polyacrylamid – ein neuer viel versprechender Kunststoff

»Polyacrylamid ist ein weißes geruchloses Pulver, das sich in Wasser leicht löst. … Allein oder in Mischung mit zahlreichen anderen Klebstoffen angewendet, zeigt es hervorragende Klebstoffeigenschaften. … Infolge seiner bemerkenswerten Eigenschaften dürfte es sich weite Anwendungsgebiete, vor allem in der Papierindustrie, erobern. Insbesondere soll Polyacrylamid auf Grund der bisherigen Erprobungsergebnisse Naturprodukten wie Stärke, Kasein, Gelatine und Leim, aber auch synthetischen Polymerisationsprodukten wie Carboxymethylcellulose überlegen sein.« *Chemiker-Zeitung, Nr. 16, 20. August 1958, 82. Jg., S. 589*

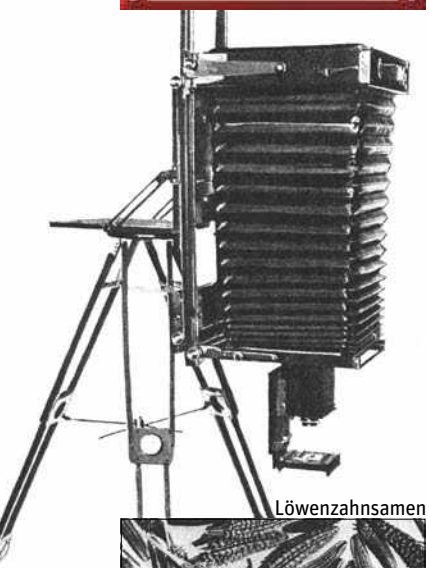
Die »3-D«-Schallplatte ist da!

1958

»Bei der Überlegung, in einer Schallplattenrille nun zwei Kanäle unterzubringen, erinnerte man sich daran, daß Thomas A. Edison 1877 seine Rillen ganz anders geschnitten hatte. Bei ihm führte die Abtastnadel keine seitlichen Bewegungen aus, sondern glitt in einer Tiefenschrift über Berge und Täler, deren Folge genau den Tonfrequenzen entsprach. Schon 1930 wurde in einem Patent vorgeschlagen, diese Edison- und die Seiten-Schrift für eine stereophone Zweikanalaufzeichnung zu verbinden. Aber erst jetzt wurde die Zweikomponenten-Schrift vom Telefunken-Entwicklungslabor wieder aufgegriffen.« *Hobby, Nr. 8, August 1958, 6. Jg., S. 28*

Auf und ab, hin und her: Die Stereoplatte nutzt zwei Dimensionen für zwei Kanäle.

1908



Makrofotografien ohne Mikroskop

»Bekanntlich sind ja Gegenstand und Bild von gleicher Größe, wenn ihr Abstand vom Objektiv der gleiche ist, und in ähnlicher Weise kann man dadurch die Vergrößerung des Bildes erhöhen, daß man die Mattscheibe bei fortgesetzter Annäherung des Gegenstandes entsprechend entfernt. … Wie Prof. F. Lamson Scribner am Landwirtschafts-Ministerium der Vereinigten Staaten besonders an Sämereien gezeigt hat, kann man das Verfahren in vielen Fällen mit Vorteil verwerten. … Sein Apparat stellt eine neunfache Linearvergrößerung her.« *Die Umschau, Nr. 35, 29. August 1908, 12. Jg., S. 687*

Löwenzahnsamen

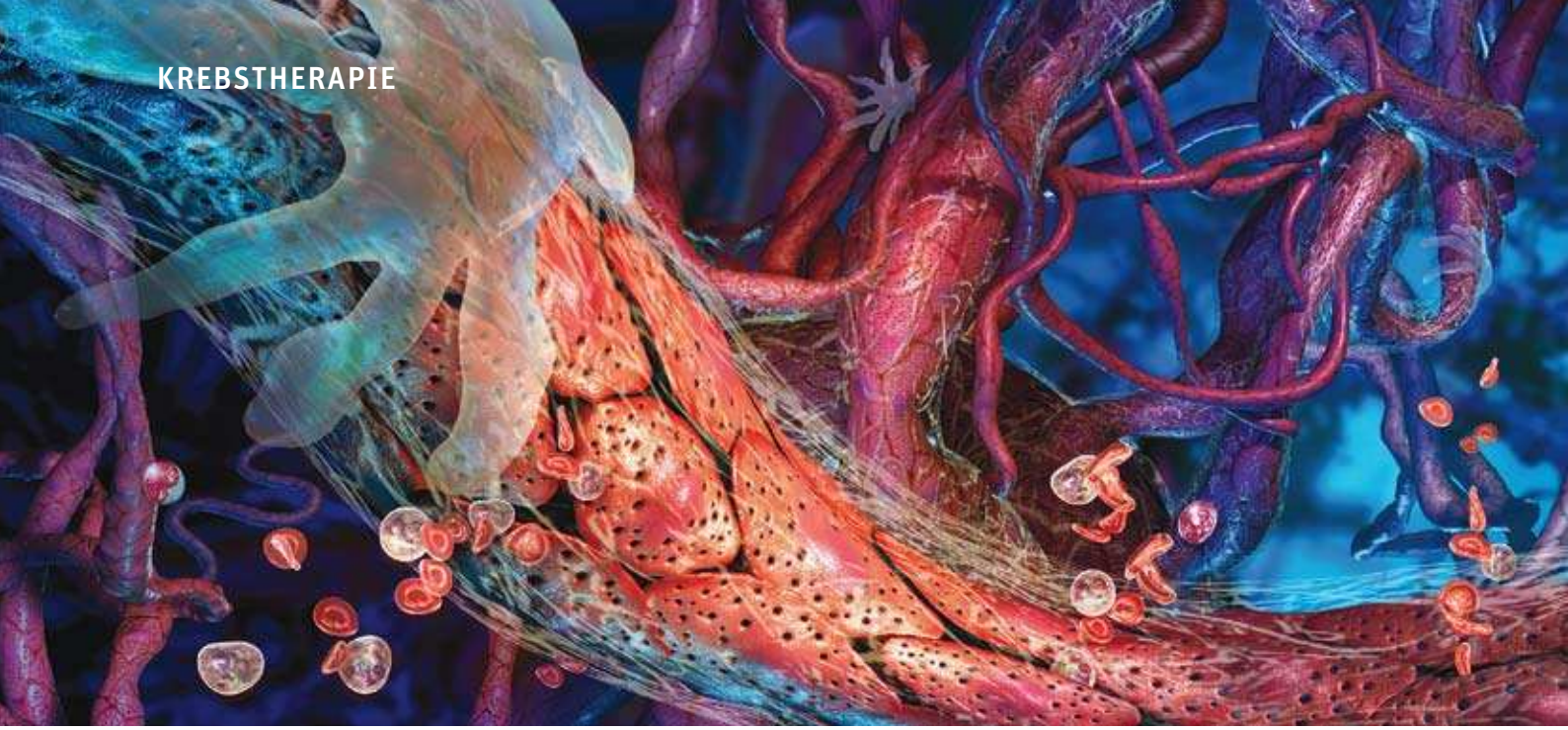
Weiter Abstand zwischen Linse und Film erlaubt der Kamera eine bis zu neunfache Vergrößerung.

Steinkohlenruß als Düngemittel

»Steinkohlenruß, der sich bei Verwendung von Steinkohlen als Feuerungsmaterial in Hauskaminen ansammelt, haben Dennstedt und F. Haßler auf seine Bestandteile hin untersucht. Sie fanden dabei, daß er im Durchschnitt 12,9 % Ammonsulfat enthielt. Dieses wird von Landwirten als Düngemittel sehr geschätzt. … In den großen Städten wird Ruß gegenwärtig in den Müllverbrennungsanstalten einfach vernichtet, ohne daß man Nutzen daraus zieht, so wird z. B. angenommen, daß Hamburg alljährlich ca. 4 000 000 kg Ruß beseitigt. … Das Ammonsulfat aus Steinkohlenruß ist also ein billiger Ersatz für den Chilisalpeter.« *Die Umschau, Nr. 31, 1. August 1908, 12. Jg., S. 617*

Flammenwerfer schafft Zügen freie Bahn

»In Gegenden, wo die Bahnlinie durch grasbewachsene Strecken führt, ist es von jeher sehr mühevoll gewesen, das wuchernde Unkraut an den Schienensträngen zu entfernen. Zu diesem Zweck hat eine der Eisenbahnverwaltungen Nord-Amerikas nunmehr einen Apparat konstruiert, der das Unkraut abbrennen soll. Der Apparat besteht aus einem automobilen Wagen. … Hinten trägt dieser eine Plattform, die zwei seitlich im Winkel verstellbare Flügel hat und eine größere Anzahl Brenner trägt, denen das Benzin als Brennstoff unter Druck zugeführt wird. … Er reinigt auf diese Weise einen Streifen etwa 4 m breit von Unkraut und leistet dabei die Arbeit von 300 Mann pro Tag.« *Rundschau für Technik und Wirtschaft, Nr. 16, 22. August 1908, 1. Jg., S. 327*



Gebändigte Blutgefäße

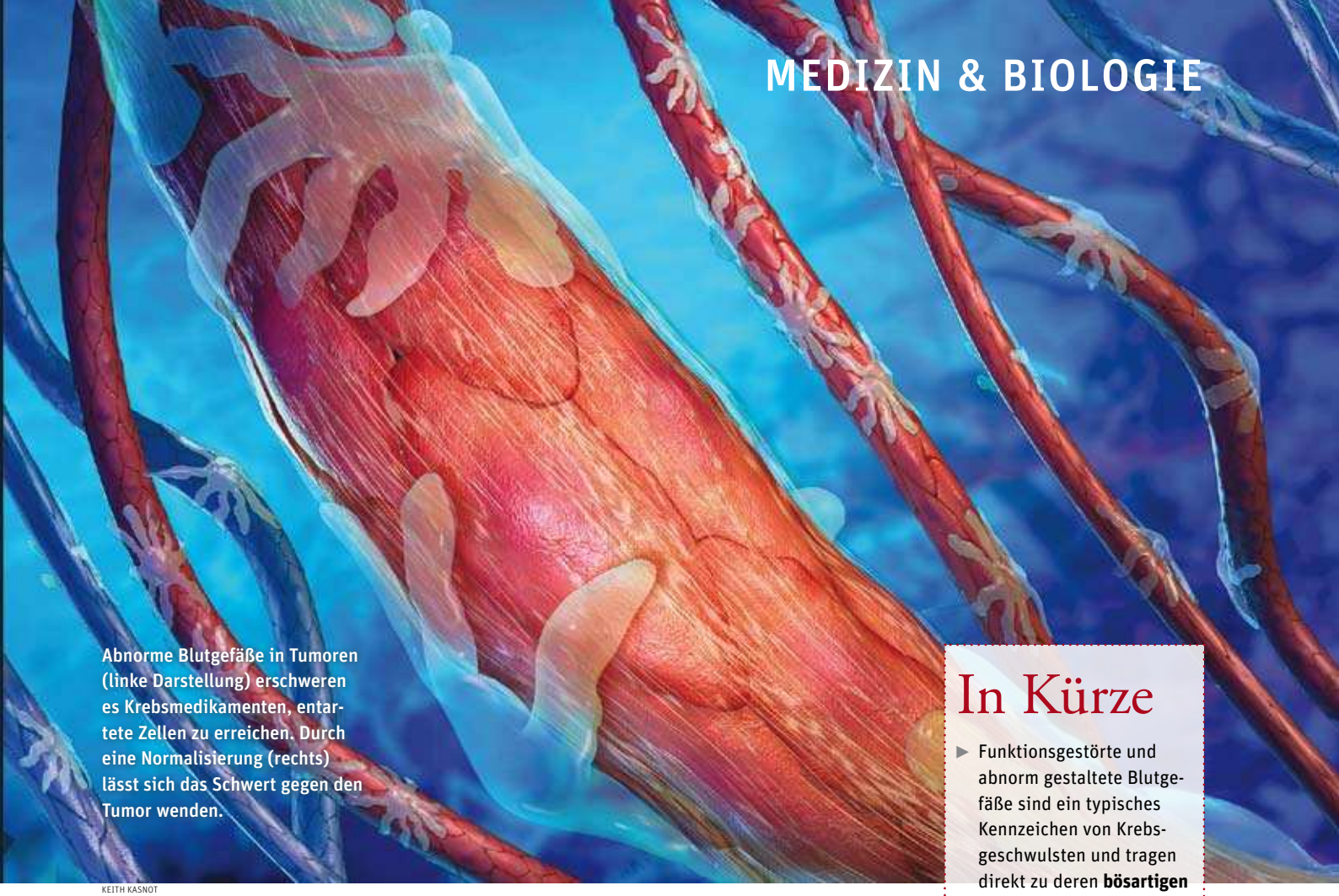
Paradox: Medikamente, die eigentlich einem Tumor die Blutzufuhr kappen sollen, normalisieren stattdessen zunächst seine chaotischen Gefäße – und öffnen damit ein Zeitfenster für seine Zerstörung.

Von Rakesh K. Jain

Tumorbiologie scheint nicht gerade die Domäne für einen Verfahrenstechniker der Chemie zu sein. Als Doktorand aber bekam ich 1974 Gelegenheit, bösartige Geschwulste aus einer höchst ungewöhnlichen Perspektive zu untersuchen. Ich arbeitete damals am National Cancer Institute in Bethesda (Maryland) im Labor von Pietro M. Gullino. Dieser hatte ein neuartiges Versuchsmodell zum Studium der Tumorbiologie entwickelt: Dazu wurde ein entnommener Rattentumor über nur ein einzelnes Gefäßpaar aus Arterie und Vene mit dem Kreislaufsystem einer anderen Ratte verbunden. Mir als Verfahrenstechniker – mit meinem erworbenen Hintergrundwissen etwa zu Flüssigkeits- und Molekültransport – bot sich hier eine Chance: einmal direkt am Krebsherd zu messen, wie viel von einem Medikament, das man dem Tier injizierte, mit dem Blut zu- und wieder abgeführt wird. Erstaunlicherweise gelangte der Großteil der verabreichten Substanz gar nicht in die Tumormasse. Schlimmer noch: Die geringe Menge, die es doch tat, verteilte sich so ungleichmäßig darin, dass sich in manchen Bereichen praktisch kein Wirkstoff anreicherte.

Sollte dies auch bei menschlichen Tumoren der Fall sein? Der Gedanke war Besorgnis erregend. Selbst wenn nur ein Bruchteil der bösartigen Zellen mangels ausreichender Medikamenteneinwirkung überlebte, könnten sie früher oder später wieder auswuchern. Anscheinend war das Wegenetz in Tumoren gestört, was die Verteilung von Medikamenten darin entscheidend beeinträchtigte – und es reizte wohl den Verfahrenstechniker in mir, dieses Problem näher zu betrachten und möglichst zu lösen.

In den folgenden Jahrzehnten erforschten meine Kollegen und ich die abnorme Gefäßarchitektur von Tumoren und wie sie nicht



Abnorme Blutgefäße in Tumoren (linke Darstellung) erschweren es Krebsmedikamenten, entartete Zellen zu erreichen. Durch eine Normalisierung (rechts) lässt sich das Schwert gegen den Tumor wenden.

KEITH KASNOT

nur die übliche Therapie behindert, sondern sogar unmittelbar zu einigen der bösartigen Charakteristika von Krebsgeschwulsten beiträgt. Auf der Basis dieser Erkenntnisse entwickelten wir Behandlungsansätze und testeten sie an Mäusen – mit Erfolg. Dabei entdeckten wir ein zunächst paradox erscheinendes Phänomen: Eine Gruppe von Wirkstoffen, die eigentlich die Blutgefäße eines Tumors zerstören, ihn also aushungern soll, induziert in Wirklichkeit zunächst deren Normalisierung. Und eben dies, so die Idee, eröffnete ein Zeitfenster zur effektiveren konventionellen Bekämpfung der Tumoren.

Hindernisse für Medikamente

Der eigentliche Prüfstein sind aber Krebspatienten. Die Aufregung in unserem Labor war daher groß, als wir schließlich in den letzten Jahren die ersten klinischen Belege sahen, dass menschliche Tumoren nach Normalisierung ihrer Gefäßversorgung schrumpften – wie wir es vorhergesagt hatten. Es erfordert noch große Anstrengungen, diesen therapeutischen Ansatz zu optimieren und seinen Nutzen für Patienten mit unterschiedlichen Formen von Krebs auszuloten. Immerhin ebnet aber unser bereits erarbeitetes Wissen zugleich den Weg zur Behandlung anderer Erkrankungen, die mit abnormen Gefäßen einhergehen. Dazu gehört die altersbedingte Makuladegeneration, die häufigste Ursache für Erblindung auch in Deutschland.

Die Forschungsarbeiten, die letztlich zu unseren heutigen Erfolgen führten, nahmen wir erst ein paar Jahre nach meiner Doktorarbeit ernsthaft in Angriff. Meine Kollegen und ich wollten herausfinden, weshalb Arzneistoffe eine Tumormasse nicht gleichmäßig durchdringen, und so begannen wir, jeden einzelnen Schritt dieses Vorgangs an Mäusen zu untersuchen. Mit vielfältigen Techniken beobachteten wir, wie eine Substanz die kleinsten Blutgefäße des Tumors erreichte, durch deren Wand in das umgebende Gewebe gelangte, in einzelne Krebszellen eindrang und schlussendlich die Tumormasse wieder verließ. Gemeinsam mit anderen Wissenschaftlern und meinen Studenten entwickelten wir Methoden, um Moleküle wie Sauerstoff auf ihrem Weg durch Gefäße und Gewebe zu verfolgen. Schließlich konnten wir sogar beobachten, wie Gene in einzelnen Zellen an- und abgeschaltet werden.

Schon früh fiel auf, wie wenig die Blutgefäße im Inneren eines Tumors der normalen

In Kürze

- Funktionsgestörte und abnorm gestaltete Blutgefäße sind ein typisches Kennzeichen von Krebsgeschwulsten und tragen direkt zu deren **bösartigen Eigenschaften** bei. Gleichzeitig können Medikamente die entarteten Zellen schlechter erreichen und zerstören.
- Eine gewisse Normalisierung der Blutgefäße sollte Krebsmedikamenten ein **besseres Vordringen** ins Gewebe ermöglichen und ihre Arbeit erleichtern, die teilweise auf chemischen Prozessen mit Sauerstoff beruht.
- Eine solche normalere Situation stellen unerwarteterweise zunächst Medikamente her, die zur **Zerstörung der Tumorblutgefäße** gedacht waren. Sie bieten nicht nur bei Krebs einen neuen therapeutischen Ansatz, sondern auch bei bestimmten anderen Erkrankungen, wie der altersbedingten Makuladegeneration, die mit abnormen Blutgefäßen einhergehen.

In Tumorgefäßen kann Blut sogar umgekehrt fließen

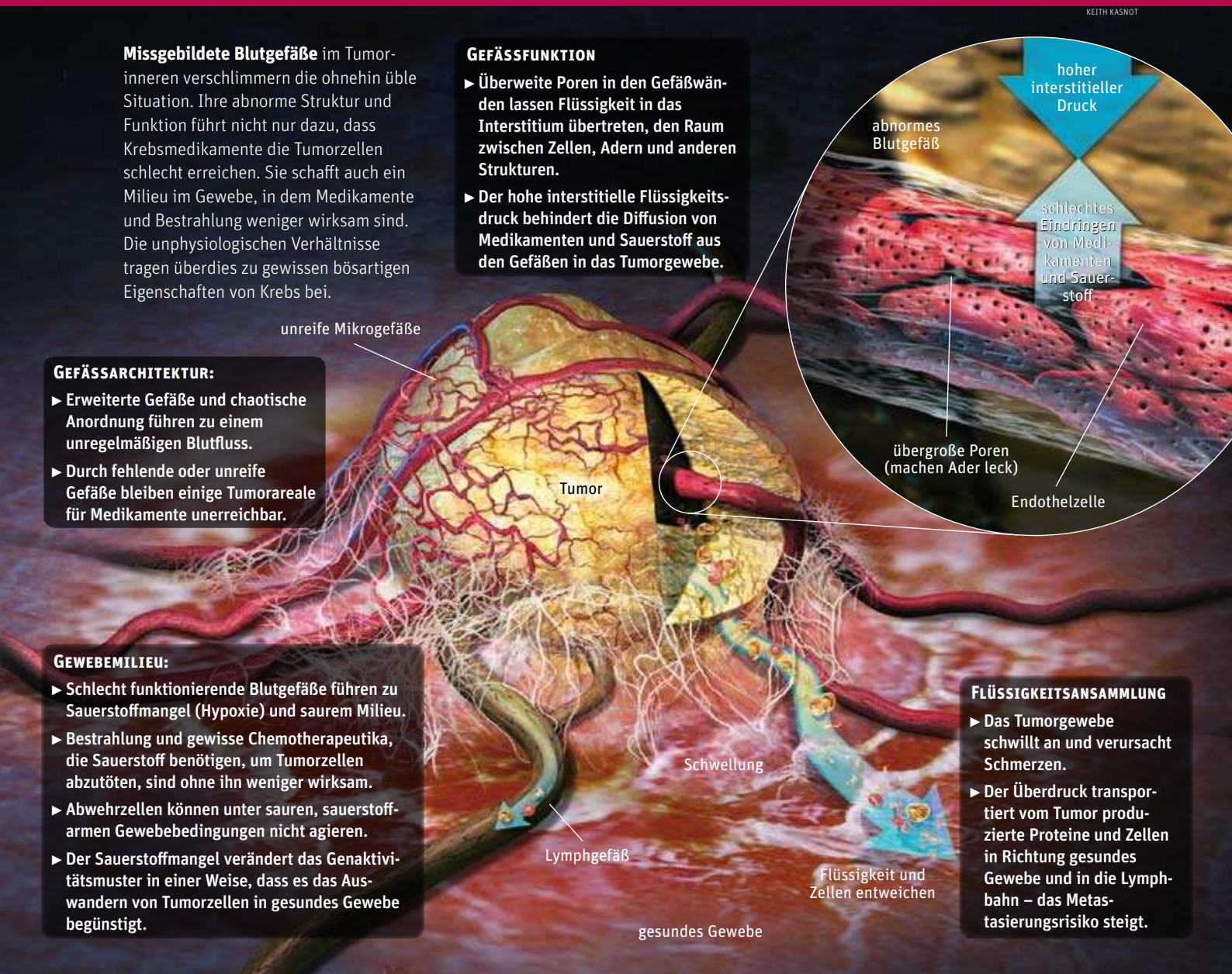
Situation glichen. Gesundes Gewebe wird von weit gehend geradlinig verlaufenden Arterien gespeist, die sich in vorhersagbarer Weise zu immer dünneren und schließlich zu Kapillaren verzweigen. Sie bilden ein alles durchdringendes Netz zur Versorgung der Zellen mit Sauerstoff und Nährstoffen. Wenn dagegen Tumoren das Wachstum neuer Blutwege anregen, ergibt sich gewöhnlich eine chaotische Szenerie: beliebig verknüpft, mit teils überdimensionierten Seitenarmen nebst vielen nutzlosen unreifen Mikrogefäßen und einigen leeren Stellen in dem Gewirr.

Im Lauf vieler Jahre gelang es uns nicht nur, die Prozesse zu beschreiben, welche die Ausbreitung von Flüssigkeiten, Substanzen und Zellen in diesem Gefäßgewirr bestimmen, sondern auch die Folgen der Abnormitäten zu durchschauen. Heraus kam ein erschreckendes Bild. Als Allererstes stellten wir fest, dass Tumorgefäße nicht nur chaotisch aussehen, sondern in jeglicher Hinsicht – strukturell wie funktionell – grundlegend von der Norm abweichen. In einigen fließt das Blut recht rasch, in anderen bewegt es sich kaum von der Stelle. Es kann sogar in ein und demselben Gefäß eine Zeit lang in die eine Richtung und dann wieder umgekehrt fließen. Schon dieses ungeordnete Strömungsmuster allein stellt ein erhebliches Problem für eine gleichmäßige Wirkstoffzufuhr dar. Dazu kommt, dass die Gefäßwände an manchen Stellen überaus durchlässig sind, an anderen dagegen ungewöhnlich dicht. Wenn Moleküle es über den Blutweg bis dorthin geschafft haben, können sie daher nur sehr ungleichmäßig in das umgebende Gewebe eindringen.

Als wir den Gründen für die unterschiedliche Durchlässigkeit nachgingen, fanden wir in manchen Tumorgefäßen Poren von ein bis zwei Mikrometer Durchmesser, 100-mal grö-

Vielfältige Probleme durch abnorme Gefässe

KEITH KASNOT



Missgebildete Blutgefäße im Tumorinneren verschlimmern die ohnehin üble Situation. Ihre abnorme Struktur und Funktion führt nicht nur dazu, dass Krebsmedikamente die Tumorzellen schlecht erreichen. Sie schafft auch ein Milieu im Gewebe, in dem Medikamente und Bestrahlung weniger wirksam sind. Die unphysiologischen Verhältnisse tragen überdies zu gewissen bösartigen Eigenschaften von Krebs bei.

Gefässfunktion

- Überweite Poren in den Gefäßwänden lassen Flüssigkeit in das Interstitium übertreten, den Raum zwischen Zellen, Adern und anderen Strukturen.
- Der hohe interstitielle Flüssigkeitsdruck behindert die Diffusion von Medikamenten und Sauerstoff aus den Gefäßen in das Tumorgewebe.

Gefässarchitektur:

- Erweiterte Gefäße und chaotische Anordnung führen zu einem unregelmäßigen Blutfluss.
- Durch fehlende oder unreife Gefäße bleiben einige Tumorareale für Medikamente unerreichbar.

Gewebemilieu:

- Schlecht funktionierende Blutgefäße führen zu Sauerstoffmangel (Hypoxie) und saurem Milieu.
- Bestrahlung und gewisse Chemotherapeutika, die Sauerstoff benötigen, um Tumorzellen abzutöten, sind ohne ihn weniger wirksam.
- Abwehrzellen können unter sauren, sauerstoffarmen Gewebebedingungen nicht agieren.
- Der Sauerstoffmangel verändert das Genaktivitätsmuster in einer Weise, dass es das Auswandern von Tumorzellen in gesundes Gewebe begünstigt.

Flüssigkeitsansammlung

- Das Tumorgewebe schwillt an und verursacht Schmerzen.
- Der Überdruck transportiert vom Tumor produzierte Proteine und Zellen in Richtung gesundes Gewebe und in die Lymphbahn – das Metastasierungsrisiko steigt.

ßer als sonst. An derart löchrigen Wandbereichen kann sich kein normales Druckgefälle mehr aufbauen. In gesunden Adern ist der Druck typischerweise viel höher als in der umgebenden Gewebsflüssigkeit (fachlich interstitielle Flüssigkeit genannt). Weil aber Tumorgefäße so porös sind, entweicht ihnen Flüssigkeit und lässt den Druck im Gewebe steigen, bis er etwa so hoch ist wie in ihrem Inneren.

Atemnot im Tumor

Diese unnatürlichen Druckverhältnisse hindern nicht nur Medikamente daran, die zu bekämpfenden Zellen zu erreichen, sondern lassen durch die Flüssigkeitsansammlung das Gewebe in der und um die Wucherung anschwellen. Solche Ödeme werden für Patienten mit Tumoren des Gehirns, das sich in der Schädelkapsel ja nur begrenzt auszudehnen vermag, schon per se zu einem ernsten, oft lebensbedrohlichen Problem. Bei Patienten mit anderen Krebsarten kann sich die ausgetretene Flüssigkeit in Körperhöhlen sammeln. Wo immer sie hingelangt, führt sie Tumorzellen sowie Tumorproteine mit sich, die dann im umgebenden gesunden Gewebe und in Lymphknoten das Wachstum von Lymph- und Blutgefäßen anregen. Und über diese Bahnen können sich Krebszellen in entlegenere Körperregionen ausbreiten und dort Metastasen, also Tochtergeschwulste, bilden.

Das ist noch nicht alles. Abnorme Tumorgefäße schaffen in der Geschwulst zugleich ein unphysiologisches Milieu. Wegen der vielen nicht oder nur schlecht durchbluteten Bereiche ist das Gewebe hier nur unzureichend mit Sauerstoff versorgt. Daher herrscht im Tumorinnern verbreitet Sauerstoffmangel (fachlich Hypoxie) und damit einhergehend ein saures Milieu. Infolge der Hypoxie entwickeln sich aggressivere Tumorzellen, die eher zur Metastasierung neigen. Das saure, sauerstoffarme Milieu beeinträchtigt wiederum die Schlagkraft von körpereigenen Abwehrzellen, die sonst unter Umständen zur Bekämpfung der Krebszellen beitragen. Ähnliches gilt für die Bestrahlung und bestimmte Pharmaka, deren tödliche Wirkung auf Krebszellen von chemischen Prozessen mit Sauerstoff abhängt.

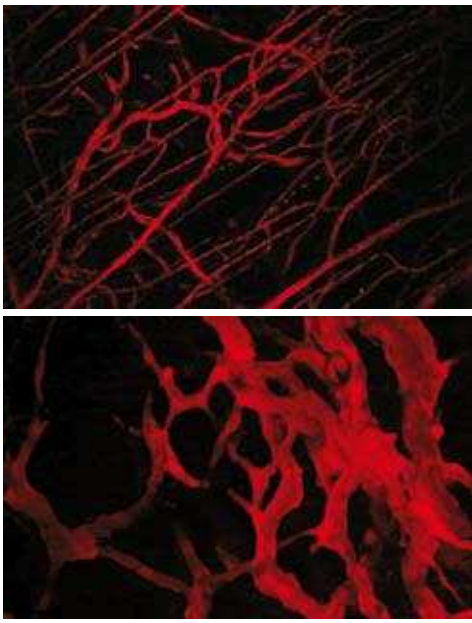
Was als Untersuchung einer scheinbar simplen Abnormität bei der Wirkstoffverteilung im Tumor begann, entpuppte sich somit von viel breiterer Relevanz für die Krebsbekämpfung, als ich zunächst gedacht hatte. Schon 1994 beschrieb ich in »Spektrum der Wissenschaft« ausführlich die bis dahin gewonnenen Einsichten (siehe SdW 9/1994, S. 48). Und bereits damals keimte bei mir und meinen mitforschenden Kollegen ein Verdacht auf: Gelänge es, die Struktur und Funktion von Tumorgefäßen wiederherzustellen, ließe sich vielleicht das Mikromilieu des Tumors normalisieren – und damit letztlich die Therapiechance verbessern. Um die Abnormität der Tumorgefäße rückgängig machen zu können, mussten wir jedoch erst einmal besser verstehen, wodurch sie entsteht und dann beibehalten wird.

Wir widmeten uns zunächst den Molekülen, die für ein normales Aussprossen von Blutgefäßen – fachlich Angiogenese genannt – verantwortlich sind. Das wichtigste davon ist der vaskuläre Endothel-Wachstumsfaktor (kurz VEGF, nach Englisch *vascular endothelial growth factor*). Dieses hochwirksame Signalprotein war ursprünglich von meinem Kollegen Harold Dvorak an der Harvard University entdeckt und zunächst als vaskulärer Permeabilitätsfaktor bezeichnet worden. VEGF fördert das Überleben und die Vermehrung von Endothelzellen, die als innerste Zellschicht Blutgefäße auskleiden. In Überdosis erhöht er aber die Durchlässigkeit, die Permeabilität, der Gefäßwände, daher sein ursprünglicher Name. In normalen Geweben steuern allerdings Gegenspieler zu VEGF und anderen derartigen Wachstumsfaktoren dem entgegen. Zu diesen natürlichen, das Gefäßwachstum hemmenden Molekülen gehört zum Beispiel Thrombospondin.

Gesunde wie kranke Gewebe, die eine bessere Blutgefäßversorgung benötigen, steigern die Produktion der Angiogenese-Stimulatoren und/oder drosseln die Synthese der Gegenspieler. Dadurch verschiebt sich das Gleichgewicht in Richtung Gefäßneubildung. Bei physiologischen Prozessen, wie zum Beispiel der Wundheilung, stellt sich das Gleichgewicht pro- und antiangiogener Einflüsse wieder ein, sobald eine ausreichende Blutversorgung etabliert ist. Bei Tumoren und einigen anderen chronischen Erkrankungen bleibt jedoch ein Ungleichgewicht bestehen, und die Blutgefäße wachsen abnorm weiter.

Probe aufs Exempel

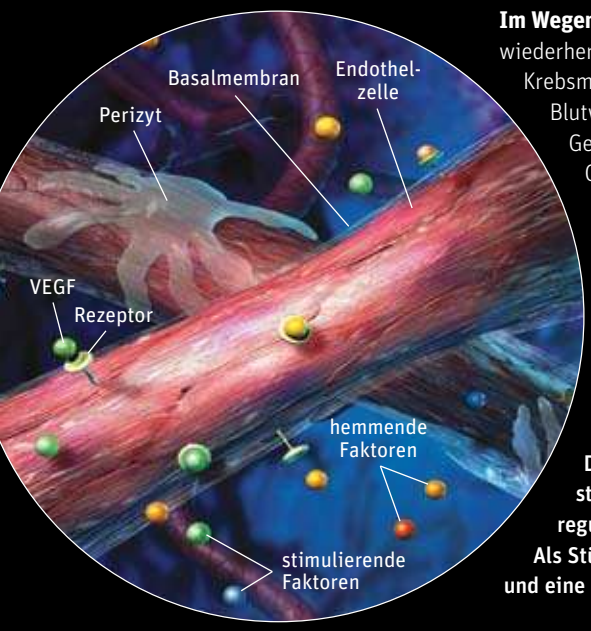
In den meisten Krebsgeschwulsten liegt VEGF in erhöhter Konzentration vor. Gelänge es, den Überschuss oder die davon ausgelösten Signale abzufangen, so vermutete ich, ließe sich die Balance wohl wieder herstellen. Alternativ könnte man versuchen, den Gehalt an antiangiogenen Faktoren zu steigern. Beides sollte die Blutwege eines Tumors zu einem gewissen Grad normalisieren, allerdings – so meine Hypothese – nicht auf Dauer: Die behandelten Gefäße würden entweder zu Grunde gehen, wenn die hemmenden Einflüsse stark genug waren, oder sie würden erneut Anomalien entwickeln, wenn der Tumor andere



AUS: RAKESH K. JAIN, MOLECULAR REGULATION OF VESSEL MATURATION, NATURE 2003, VOL. 9; GENEHMIGT VON MACMILLAN PUBL.

Das Kapillarbett in der gesunden Muskulatur einer Maus (oben) und das im Inneren eines Tumors (unten) unterscheiden sich deutlich. Tumorgefäße verzweigen sich ungeordnet und sind insgesamt überdimensioniert, dabei über einen Abschnitt nicht gleichmäßig dick, was alles zu einem irregulären Blutfluss darin beiträgt.

Die Balance verschieben – Richtung Normalität

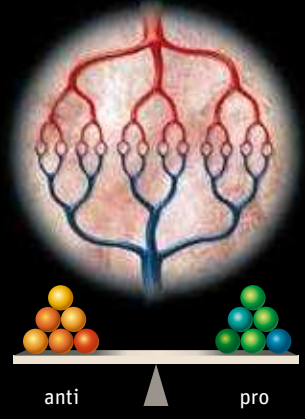


Im Wegenetz eines Tumors eine gewisse Normalität wiederherzustellen, schafft günstigere Bedingungen für Krebsmedikamente. Viele Abnormitäten der dortigen Blutwege rühren daher, dass Proteinfaktoren, die das Gefäßwachstum – die Angiogenese – fördern, die Gegenspieler überwiegen. Angiogenese-Hemmer, die den wichtigsten Gefäßwachstumsfaktor VEGF abblocken, verschieben die Balance der Signale in Richtung normales Gefäßwachstum. Sie erhalten es allerdings nicht unbegrenzt aufrecht, da entweder die Medikamente die Gefäße ganz zerstören oder der Tumor unempfindlich gegen ihre Wirkung wird.

Die normale Blutgefäßbildung wird durch stimulierende und hemmende Faktoren reguliert. Endothelzellen bilden die Wandung. Als Stützelemente sitzen Perizyten außen auf, und eine Basalmembran umhüllt alles.

Normalzustand

Bei ausgewogenen wachstumsfördernden (pro) und -hemmenden (anti) Signalen entsteht ein funktionierendes Gefäßnetz mit großen, sich regelmäßig feiner verzweigenden Blutwegen.



WIPPEN: JEN CHRISTIANSEN; ILLUSTRATIONEN: KEITH KASNOT, NACH: LANCE E. MUNN, AUS: RAKESH K. JAIN, NORMALIZING TUMOR VASCULATURE WITH ANTI-ANGIOGENIC THERAPY, NATURE MEDICINE, SEPT. 2001, BD. 7, NR. 9

Stimulatoren zu produzieren anfinge, wie den basischen Fibroblasten-Wachstumsfaktor (bFGF). Dieses Protein kann nämlich viele Effekte des VEGF nachahmen. Doch grau ist alle Theorie. Wir mussten Tumoren Angiogenese-Hemmern aussetzen und beobachten, wie sich die Situation entwickelt.

Damals, 1995, wurden gerade Medikamente auf Antikörperbasis entwickelt, die auf unterschiedliche Weise VEGF hindern sollten, seine Wirkung zu entfalten. Einige hefteten sich direkt an ihn, andere »sperrten« seinen Rezeptor auf den Endothelzellen. Mit ihnen konnten wir unseren Ansatz an Mäusen testen.

Bemerkenswerterweise führten beide Formen der VEGF-Hemmung dazu, dass die für Tumoren charakteristischen unreifen und ineffizienten Blutgefäße teilweise gekappt wurden, während die verbleibenden sich umformten und ihren normalen Gegenstücken ähnlicher wurden. Diese remodellierten Gefäße waren weniger leck, weniger erweitert und weniger gewunden. Auch funktionell besserten sich die Verhältnisse im Tumor: Unter anderem fiel der Druck in der Gewebsflüssigkeit, der Sauerstoffgehalt stieg, und Medikamente drangen leichter ein.

Diese aufregenden Ergebnisse wurden später von anderen Forschern bestätigt, allerdings ebenfalls an Tieren. Das garantierte aber nicht, dass bei Krebspatienten so etwas passierte. Zudem standen viele Kollegen unserem Vorgehen verständlicherweise skeptisch gegenüber. In den späten 1990er Jahren, als ich dann erstmalig meine Idee von der Normalisierung der Tumorblutgefäße öffentlich unterbreitete, hatten Wissenschaftler an Universitäten und Unternehmen schon eine Weile an Medikamenten zur Zerstörung eben jener Blutgefäße gearbeitet. Ihre Bemühungen basierten auf einer 1971 aufgestellten Hypothese meines Kollegen Judah Folkman von der Harvard University, Angiogenese-Hemmer könnten Tumoren aushungern und so deren Wachstum stoppen (siehe SdW 12/2002, S. 46). Tatsächlich hat die amerikanische Arzneimittelbehörde 2004, kurz darauf auch die europäische, mit Bevacizumab (Handelsname Avastin) einen VGEF neutralisierenden Antikörper zur Krebsbehandlung zugelassen, der als Angiogenese-Hemmer entwickelt wurde.

Angiogenese

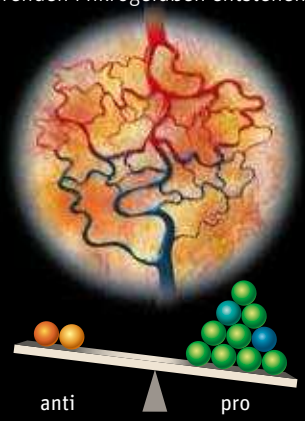
Der aus dem Griechischen abgeleitete Begriff bedeutet wörtlich Gefäßentstehung. Bezeichnet wird damit ein Vorgang, bei dem neue Blutgefäße aus den bestehenden aussprossen. Reguliert wird er durch Moleküle, die ihn fördern beziehungsweise hemmen. Neu gebildet werden Blutgefäße **beispielsweise bei der Wundheilung**, unerwünschterweise aber auch in Tumoren.

Paradoxe Effekte

Unter Laborbedingungen und in klinischen Tests vermochte Bevacizumab Blutgefäße in menschlichen und tierischen Tumoren zu zerstören. Bei Anwendung als Einzelsubstanz brachte es aber den Patienten alles in allem keinen Überlebensvorteil. In einer großen Therapiestudie jedoch, die letztlich zur Zulassung von Bevacizumab führte, verlängerte es das Überleben bei fortgeschrittenem Darmkrebs – allerdings nur in Kombination mit einer üblichen Chemotherapie. An sich positiv, erschien dies damals paradox: Ein Medikament, das Blutgefäße zerstört, sollte im Prinzip die Wirksamkeit einer Chemotherapie herabsetzen, da die dazu genutzten Pharmaka ja nur über funktionsfähige Gefäße gut das Gewebe mit den Tumorzellen erreichen. Tatsäch-

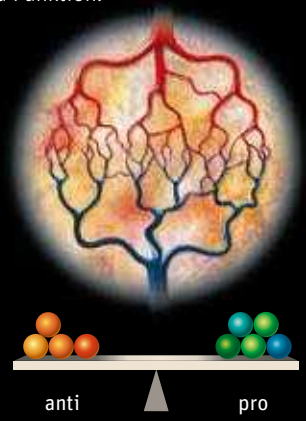
abnormer Zustand im Tumor

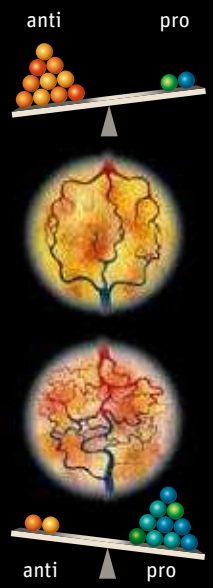
Hoher Überschuss an proangiogenen Faktoren, insbesondere an VEGF, verursacht übermäßiges Wachstum, lässt desorganisierte überdimensionierte Gefäße nebst vielen fehlfunktionierenden Mikrogefäßen entstehen.



»normalisierter« Zustand

Hemmung der wachstumsstimulierenden VEGF-Signale »stutzt« unreife Kapillaren zurück und sorgt bei verbleibenden Gefäßen für eine wieder normalere Architektur, Größe und Funktion.





Normalisierungsfenster geschlossen

Ein besonders potentes wachstumshemmendes Medikament könnte so viele Tumorgefäße dem Untergang weihen, dass zusätzlich verabreichte Krebsmedikamente nicht mehr in den Tumor eindringen (oben).

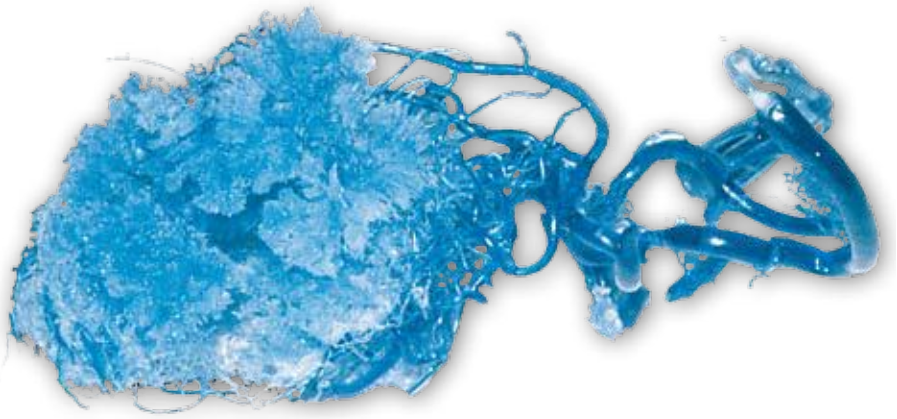
Oder der Tumor produziert, zur Kompensation der VEGF-Blockade, eine Flut anderer Wachstumsfaktoren, die ihn unempfindlich gegen Angiogenese-Hemmer machen. Die abnorme Gefäßbildung setzt wieder ein (unten).

lich hatte sich in einigen Studien gezeigt, dass Angiogenese-Hemmer einer Chemo- und Strahlentherapie hinderlich sein können. Wie also waren diese gegensätzlichen Ergebnisse zu vereinbaren?

Im Jahr 2002 – im Rahmen einer vom National Cancer Institute geförderten klinischen Studie zur Therapie von Enddarmkrebs – bekamen wir Gelegenheit, die strukturellen und funktionellen Veränderungen an Tumorgefäßen eingehend zu untersuchen. Die Patienten erhielten Bevacizumab, kombiniert mit Chemotherapie und Bestrahlung. Geleitet wurde die Studie von Christopher Willet, der heute am Medical Center der Duke University in Durham (USA) tätig ist.

Sehr rasch bemerkten wir, dass der Effekt sich nicht auf eine bloße Zerstörung der Tumorgefäße beschränkte. Zwei Wochen nach einer einzigen Injektion Bevacizumab zeigte sich zwar bei sechs Patienten in Folge durchaus ein Rückgang bei folgenden Größen im Tumor: Blutfluss (um 30 bis 50 Prozent), Dichte der Mikrogefäße, Gesamtzahl der Blutgefäße und Druck der Gewebsflüssigkeit. Auch fand dort, wo das nun ausgedünnte Gefäßnetz nicht mehr hinreichte, eine vermehrte »Selbstauflösung« von Tumorzellen statt. Dabei handelt es sich um eine Apoptose, eine Form des programmierten Zelltods, der unter anderem bei Sauerstoff- und Nährstoffmangel eingeleitet wird.

Die Überraschung aber war: Der Gesamtenergieverbrauch des Tumors – gemessen anhand der Aufnahme markierter Glukose – ging nicht zurück, was eigentlich zu erwarten gewesen wäre, wenn die Behandlung die Geschwulst aushungerte. Stattdessen schien es, als würden die verbleibenden Gefäße besser funktionieren und dadurch den Energieansprüchen der überlebenden Tumorzellen effizienter nachkommen. In einigen der Tumoren vermehrten sich Krebszellen sogar stärker, was ihre bessere Versorgung und ihr günstigeres Milieu widerspiegelte. Eine beschleunigte Zellteilung ist zwar gewöhnlich keineswegs das,



AUS: RAKESH K. JAIN ET AL., GEOMETRIC RESISTANCE AND MICROVASCULAR NETWORK ARCHITECTURE OF HUMAN COLORECTAL CARCINOMA, MICROCIRCULATION 1997, BD. 4, NR. 1

Dieser Kunstharzausguss der Blutgefäße eines herausoperierten Dickdarmtumors zeigt, welch chaotisches Gewirr an wuchernden Mikrogefäßen ihn füllte (dichte kristallin wirkende Masse). Gleichzeitig gibt es großräumige Aussparungen darin – dort waren Tumorareale komplett ohne Blutversorgung.

was man bei Krebs wünscht, doch sie erhöht die Empfindlichkeit für Chemotherapeutika (und Strahlung), die im Allgemeinen auf teilungsaktive Zellen besonders gut wirken.

Alles in allem lieferte dies einen ersten Einblick, wie ein Mittel wie Bevacizumab im Patienten wirkt und weshalb es innerhalb einer gewissen Zeitspanne einer Bestrahlung oder Chemotherapie zu besserem Ergebnis verhelfen könnte. Während das Medikament VEGF blockiert, wird ein Teil der Tumorgefäße umgehend gekappt, der Rest jedoch ein Stück weit normalisiert. Dieser letzte Effekt verbessert das Gewebemilieu und erleichtert Krebsmedikamenten den Zugang zu den überlebenden bösarigen Zellen. Mit dem – vorübergehenden – Wiederherstellen der normalen Gefäßfunktion öffnet sich also ein Zeitfenster, innerhalb dessen Bestrahlung oder Chemotherapie ihre beste Wirkung entfalten sollte.

Um die neuen Erkenntnisse optimal anzuwenden, müsste der behandelnde Arzt allerdings wissen, wann bei seinem Patienten die Normalisierung beginnt und wie lange sie anhält. Meine Forschungsgruppe kehrte daher zu Experimenten an Mäusen zurück, um dieses Zeitintervall – wir tauften es das Normalisierungsfenster – näher einzugrenzen. Wir verabreichten Tieren mit Hirntumoren einen Antikörper, der den Hauptrezeptor der Endothelzellen für VEGF blockiert. Bereits am ersten Tag nach Therapiebeginn waren Anzeichen einer Gefäßnormalisierung zu erkennen. Innerhalb des Fensters, das nur etwa fünf bis sechs Tage umfasste, stieg die Sauerstoffversorgung im Tumor – und die Bestrahlung zeigte die beste Wirkung.

Ein therapeutisches Fenster

Andere Forscherteams, die ebenfalls mit Labortieren arbeiteten, berichteten dann Ähnliches. Dank der hinreichenden tierexperimentellen Stütze konnten wir unser Prinzip in einer wiederum vom National Cancer Institute geförderten klinischen Studie überprüfen. Sie fand unter Leitung meiner Kollegen Tracy Batchelor und Gregory Sorensen vom Massachusetts General Hospital statt und wurde vor gut einem Jahr abgeschlossen. Sie umfasste 30 Patienten mit Glioblastomen; die gefährlichen Hirntumoren waren trotz aggressiver Behandlung (Operation, Bestrahlung und Chemotherapie) nachgewachsen.

Die Betroffenen hatten durchschnittlich nur noch weniger als sechs Monate zu leben. Sie erhielten täglich eine orale Dosis Cediranib (Handelsname Recentin). Dieser experimentelle Wirkstoff hemmt hocheffektiv die drei wichtigsten Zellrezeptoren für VEGF. Mit Hilfe moderner bildgebender Verfahren konnten wir fast sofort Veränderungen in den Tumoren feststellen. Als Zeichen einer Gefäßnormalisierung sahen wir unter anderem, dass der Durchmesser der Adern sich verkleinerte und die Durchlässigkeit ihrer Wandung abnahm. Dies hielt für mindestens 28 Tagen an, einige weitere Merkmale der Normalisierung blieben sogar über den gesamten viermonatigen Studienzeitraum bestehen. Zudem ging die Schwellung im Tumorareal rasch zurück,

Gefässreparatur jenseits von Krebs

Einige hundert Millionen Menschen weltweit leiden an anderen Erkrankungen als Krebs, die aber ebenfalls mit Abnormitäten der Blutgefäße einhergehen. Deren Wachstum und Funktion medikamentös zu beeinflussen, könnte ein wesentlicher Bestandteil der Therapie solcher Leiden werden.

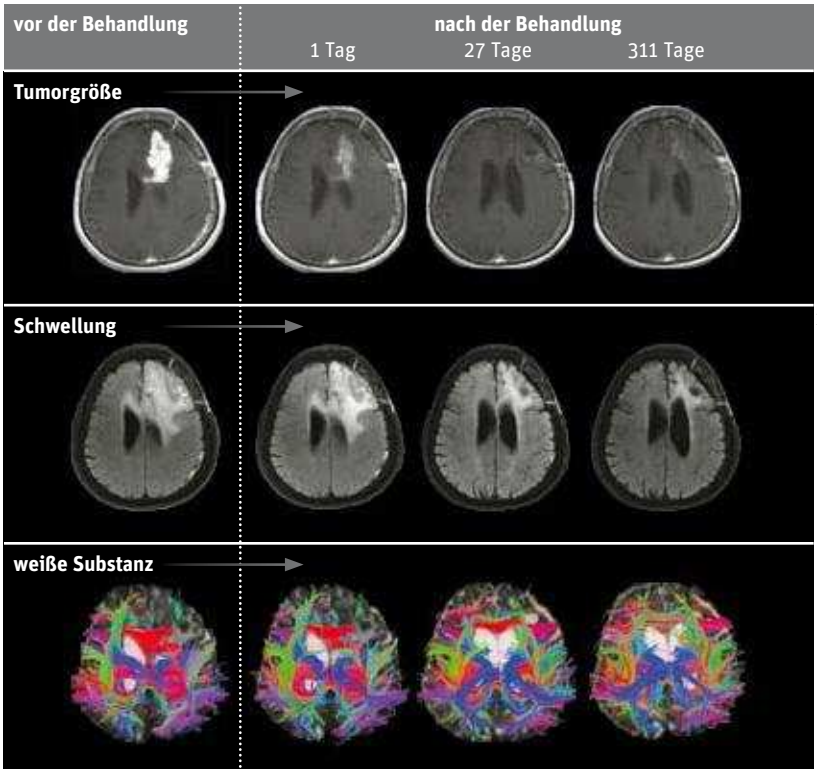
Zu den häufigsten Erkrankungen dieser Kategorie gehört die Arteriosklerose. Typisch dafür sind fetthaltige Ablagerungen in der Innenwand der Arterien. Dort, in den so genannten arteriosklerotischen Plaques, sammeln sich entzündungsfördernde Blutzellen und Zelltrümmer, wodurch sich die Masse allmählich vergrößert. Ähnlich wie bei einem Tumor sprossen feine Gefäße ein, um das Gebilde zu versorgen. Mit Tumorgefäßen teilen sie viele Merkmale. Beispielsweise sind sie undicht und desorganisiert. Im Prinzip sollten Angiogenese-Hemmer auch diese feinen Gefäße normalisieren. Das würde die Plaques (die leicht aufplatzen können und dann Gerinnsel fördern) stabilisieren und deren weiteres Ausdehnen stoppen.

Auch bei Augenerkrankungen wie der diabetischen Retinopathie und der feuchten Form der altersbedingten Makuladegeneration (AMD) zeigt sich eine abnorme Gefäßarchitektur, ähnlich derjenigen in Tumoren. Typisch für die feuchte Form sind undichte Blutgefäße im Bereich der Netzhaut, aus denen Blutflüssigkeit ins Umfeld sickert und die Sehfähigkeit mindert. Millionen von Menschen weltweit leiden an einer Makuladegeneration, rund 85 Prozent an der trockenen Form, mit dem Risiko, ebenfalls an der feuchten Form zu erkranken. Bei Letzterer sind die größten Fortschritte beim Einsatz von Angiogenese-Hemmern außerhalb der Krebstherapie zu verzeichnen. Zwei VEGF-Hemmer, Ranibizumab (Handelsname Lucentis) und Pegaptanib (Handelsname Macugen) sind zur Therapie der feuchten Makuladegeneration zugelassen – höchstwahrscheinlich mindern sie die zu hohe Durchlässigkeit der Gefäßwände.

Das Konzept könnte auch zur Behandlung von Ödemen (Wassereinlagerungen im Gewebe) bei verschiedenen Leiden nützlich und ebenso in der Gewebezüchtung und in der regenerativen Medizin hilfreich sein, wo es nötig ist, normal funktionierende Gefäße zu schaffen und zu erhalten.

Die altersdedingte Makuladegeneration AMD betrifft den so genannten gelben Fleck der Netzhaut, die Makula, mit dem Bereich schärfsten Sehens. Normalerweise erscheint er leicht dunkel (links). Sprossen dort abnorme Gefäße, wie bei der feuchten, aggressiven Form der AMD, treten Blutkomponenten aus (rechts). Das Sehvermögen verschlechtert sich rasch.

KANG ZHANG UND JAMES GILMAN, UNIVERSITY OF UTAH, MORAN EYE CENTER



AUS: TRACY T. BATCHELOR ET AL., AZD2171 A PAN-VEGF RECEPTOR TYROSINE KINASE INHIBITOR (...), CANCER CELL, JAN. 2007, VOL. 11; GENEHMIGT VON ELSEVIER

Die Art und Weise, wie Hirntumoren auf eine Behandlung mit Angiogenese-Hemmern ansprechen, spiegelt einige Effekte der Gefäßnormalisierung wider. Kernspintomografische Aufnahmen zeigen, wie das hell wiedergegebene Tumorareal im Verlauf der Therapie schrumpfte (obere Bildfolge). Auch das ausgedehnte Ödem dort bildete sich zurück (mittlere Bildfolge). Das vorher zusammengedrückte übrige Hirngewebe kehrte in seine alte Lage zurück (untere Bildfolge), erkennbar an den hier farbkodierten Faserzügen.

ein erwarteter Effekt, der sich über die gesamte Dauer der Einnahme von Cediranib fortsetzte (siehe Abbildung oben). Wegen der teils schweren Nebenwirkungen baten jedoch einige Patienten um Unterbrechung, und wir konnten beobachten, wie sich die Gefäße nach Absetzen des Medikaments wieder abnorm veränderten und dann bei erneuter Einnahme ein zweites Mal normalisierten.

Diese Untersuchung zeigte erstmalig, wie lang der Zeitraum einer Gefäßnormalisierung beim Menschen sein kann. In einer wesentlich größeren klinischen Studie mit 300 Glioblastom-Patienten wird derzeit Cediranib mit und ohne Chemotherapie eingehender geprüft. Bei neu diagnostizierten oder wieder aufgetretenen Tumoren anderer Organe untersuchen wir zudem die Wirkung verschiedener Angiogenese-Hemmer in Kombination mit herkömmlichen Therapien. Gleichzeitig erforschen wir Möglichkeiten, das Zeitfenster der Gefäßnormalisierung zu vergrößern, um so vielleicht den Überlebensvorteil von Monaten auf Jahre zu steigern.

Eines muss man jedoch stets im Blick haben: Mit einer Blockadepolitik gegen VEGF allein, gleich mit welchem Medikament, wird sich sicherlich nicht immer eine Normalisierung erreichen oder aufrechterhalten lassen. Denn Tumoren können auf andere Wachstumsfaktoren ausweichen. Mit dem Größerwerden produzieren sie neben VEGF gewöhnlich verschiedenartige proangiogene Moleküle, so dass ihr Gefäßsystem vermutlich mit

wichtige **online** **adressen**

Brainlogs
Blogs für die Welt im Kopf
www.brainlogs.de

Foto-Scout-Zuse
Die lernende Bildsuchmaschine für Ihren PC.
www.foto-scout-zuse.com

Kernmechanik – von Kernspin bis Kosmologie, von Dunkler Materie und Energie
www.kernmechanik.de

KOSMOpod
Astronomie zum Hören
www.kosmopod.de

Portraits, Interieurs, Landschaften, Figurativa u. a.
Dipl.-Des. Ewa Kwasniewska
– Kunstmalerin –
www.kwasniewska.com

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Susanne Förster
Telefon 0211 61 88-563
E-Mail: s.foerster@vhb.de

Rakesh K. Jain ist Andrew-Werk-Cook-Professor für Tumorbiologie und Direktor des Edwin-L.-Steele-Labors für Tumorbiologie des Massachusetts General Hospital und der Harvard Medical School. Er dankt dem National Cancer Institute, das seine Arbeit seit 1980 unterstützt, sowie den weltweit mehr als 200 Doktoranden, Postdocs und Kooperationspartnern, die ihn bei der Erforschung von Tumoren begleitet haben. Jain berät mehrere Pharma- und Biotechfirmen und ist Mitglied der Nationalen Akademie für Ingenieurwissenschaften und des Instituts für Medizin der USA.

Jain, R. K.: Normalization of the Tumor Vasculature: An Emerging Concept in Anti-Angiogenic Therapy of Cancer. In: Science 307, S. 58 – 62, 2005.

Jain, R. K. et al.: Lessons from Phase III Trials of Anti-VEGF Therapy for Cancer. In: Nature Clinical Practice Oncology 3(1), S. 24 – 40, 2006.

Jain, R. K. et al.: Angiogenesis in Brain Tumors. In: Nature Reviews Neuroscience 8, S. 610 – 622, 2007.

Jain, R. K. et al.: Antiangiogenic Therapy for Normalization of Atherosclerotic Plaque Vasculature: A Potential Strategy for Plaque Stabilization. In: Nature Clinical Practice Cardiovascular Medicine 4(9), S. 491 – 503, 2007.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/960473.

der Zeit schlechter auf Medikamente wie Bevacizumab anspricht.

Bei Patienten mit Enddarmkrebs beobachteten wir, dass die Konzentrationen von VEGF und dem ihm verwandten plazentalen Wachstumsfaktor PIGF im Blut ansteigen, nachdem VEGF durch Bevacizumab abgefangen worden war. Das lässt vermuten, dass der Tumor oder andere Gewebe zum Ausgleich mehr davon produzierten. Und bei Patienten mit wieder aufflackerndem Glioblastom stiegen die Blutkonzentrationen verschiedener proangiogener Moleküle, als die Tumoren gegen Cediranib unempfindlich wurden.

Angesichts der Vielfalt solcher Signalstoffe gilt es, Medikamentencocktails zusammenzustellen, die individuell auf das molekulare Profil des jeweiligen Tumors und seiner Metastasen abgestimmt sind und auch den zu erwartenden Veränderungen dieses Profils angepasst werden können. Glücklicherweise lässt sich eine Normalisierung der Tumorgefäße nicht nur mit Medikamenten erreichen, die Wachstumsfaktoren wie VEGF direkt hemmen. So konnten wir vor Kurzem an Mäusen nachweisen, dass Trastuzumab (Handelsname Herceptin) sich letztlich ähnlich auswirkt wie ein Cocktail verschiedener Angiogenese-Hemmer und dadurch Tumorgefäße normalisiert. Dabei handelt es sich um einen Antikörper gegen den Zelloberflächenrezeptor HER2, der bei etwa 25 Prozent der Brustkrebsfälle verstärkt ausgeprägt wird. Trastuzumab verringert indirekt die zelluläre Produktion einiger proangiogener Faktoren, während es zugleich die des Gegenspielers Thrombospondin-1 steigert.

Es geht allerdings nicht nur um geeignete Medikamente. Nötig sind auch wenig belastende und bezahlbare Methoden, mit denen der Arzt den Normalisierungsprozess beobachten kann, um ihn bestmöglich für die Krebstherapie zu nutzen. Daher suchen meine Kollegen und ich nach so genannten Biomarkern: leicht erkennbare Anzeichen, die Vorgänge im Tumor widerspiegeln und dabei das individuelle Zeitfenster der Gefäßnormalisierung verraten. Solche Marker könnten zum Beispiel Proteine im Blut oder Urin sein, deren Konzentration im entscheidenden Zeitintervall sinkt oder steigt.

Fernziel: Therapie nach Maß

Die neuere Erkenntnis, dass Angiogenese-Hemmer die krankhafte Gefäßarchitektur von Tumoren zu normalisieren vermögen, sollte nicht zu der Ansicht verleiten, ihr ursprünglicher Ansatz hätte keine Bedeutung mehr. Würde ein Medikament eine Geschwulst komplett aushungern und das Leben eines Patienten retten, indem es schlagkräftig und zielgenau genügend Tumorgefäße zerstört, so wäre das ein Segen. Dass diese Substanzen jedoch auch eine gewisse Normalisierung der Gefäßsituation herbeiführen können, macht sie zu wertvollen Werkzeugen, um Krebs auf mehr als eine Weise zu bekämpfen. Auf lange Sicht nutzt diese Forschung auch den Millionen von Menschen mit andersartigen Erkrankungen, wo abnorme Gefäße auftreten – darunter die altersbedingte Makuladegeneration und die Arteriosklerose (siehe Kasten S. 42).

Vor 30 Jahren, zu Beginn meiner Untersuchungen, konnte ich nicht ahnen, wohin der Weg führt. Ich hätte mir nicht träumen lassen, dass eines Tages ein Patient ins Krankenhaus kommt und nach Messung verschiedener Biomarker eine maßgeschneiderte Behandlung zur Normalisierung und Reparatur krankhafter Blutgefäße erhält. Dem Ziel sind wir nun näher gekommen. ◁

 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Der versteckte Winterschlaf der Wildpferde

Prschewalski- oder Urwildpferde drosseln in der kalten Jahreszeit ihre Aktivität, ihre Körpertemperatur und ihren Stoffwechsel – und damit ihren Energieverbrauch. Hierdurch sind sie auf die harten Winter der Mongolei gut vorbereitet.

MIT FRDL. GEN. VON PETRA KACZENSKY

Von Regina Kuntz

Allem Anschein nach starben die letzten Wildpferde, genauer die letzte Unterart des Urwildpferds, in freier Natur vor einigen Jahrzehnten aus. Prschewalskipferde (früher Przewalski geschrieben) haben nur in einigen Zoos und Freigehegen überlebt. Seit Mitte der 1990er Jahre werden sie nun wieder in ihrem ursprünglichen Verbreitungsgebiet in Innerasien angesiedelt. Obwohl diese Stuten und Hengste vorher nicht an die extrem harten, langen Winter der mongolischen Steppen gewöhnt waren, kommen sie mit dem dortigen Klima offensichtlich gut zurecht und haben sich sogar schon vermehrt.

Wie überstehen die Wildpferde den anhaltenden Nahrungsmangel bei Temperaturen von bis zu minus 40 Grad Celsius in ihrer neuen alten Heimat? Wie trotzen sie den heftigen, oft tagelangen Schneestürmen? Ein Wissenschaftlerteam des Forschungsinstituts für Wildtierkunde und Ökologie der Veterinärmedizinischen Universität Wien (FIWI) fand unter Leitung von Walter Arnold heraus, dass Prschewalskipferde dem Winter nicht etwa, wie man vermuten könnte, mit besonders hoher Stoffwechselverbrennung widerstehen. Vielmehr scheinen sie im Gegenteil eine Reihe von Energiesparmaßnahmen vorzuneh-

ALLE FOTOS DES ARTIKELS (SOFERN NICHT ANDERS ANGEGEBEN): REGINA KUNTZ

Die Prschewalskipferde, die jetzt wieder frei in der Mongolei leben, halten die harten Winter erstaunlich gut aus (linkes Bild, freundlicherweise von Petra Kaczensky zur Verfügung gestellt). Mit welchen Anpassungsmechanismen ihnen das gelingt, entdeckten Wiener Forscher an halbwild lebenden Urwildpferden am Neusiedler See (oben).

men, die ihr Verhalten genauso betreffen wie physiologische Umstellungen. Bei diesen Studien mit von der Partie war eine Pferdeherde des Wiener Tiergartens Schönbrunn, die im Nationalpark Neusiedler See – Seewinkel lebt, sozusagen vor den Toren Wiens, nahe der Grenze zu Ungarn.

Die Winter höherer Breiten bedeuten für Pflanzen fressende warmblütige Tiere eine besondere Herausforderung, vor allem wenn sie hauptsächlich Grünfutter äsen. Um die Energie aufzubringen, ihre Körpertemperatur aufrechtzuerhalten, müssten sie nun eigentlich viel mehr fressen als im Sommer, vor allem mehr gehaltvolle Nahrung. Doch solch hochwertiges Futter ist im Winter kaum zu finden. Viele kleinere Säugetiere überdauern die kalte Jahreszeit in einem Unterschlupf und halten dort einen monatelangen Winterschlaf: Siebenschläfer und Murmeltiere, Fledermäuse und Igel drosseln in dieser Zeit ihren Stoffwechsel und ihre Körpertemperatur bis auf wenige kurze Unterbrechungen so stark, dass sie während der harten Monate allein von ihren vorher angefressenen Energiereserven, sprich ihrem Speck, zehren können.

Was aber machen Huftiere? Bekanntlich ziehen sich Hirsche, Gämsen und andere große Pflanzenfresser den Winter über nicht in Bauten oder Höhlen zurück, sondern bleiben selbst bei Schnee und Eis im Freien aktiv. Doch auch sie wechseln in ein besser isolierendes Fell, und sie legen sich Reserven in Form einer dicken Speckschicht zu. Aber genügt das?

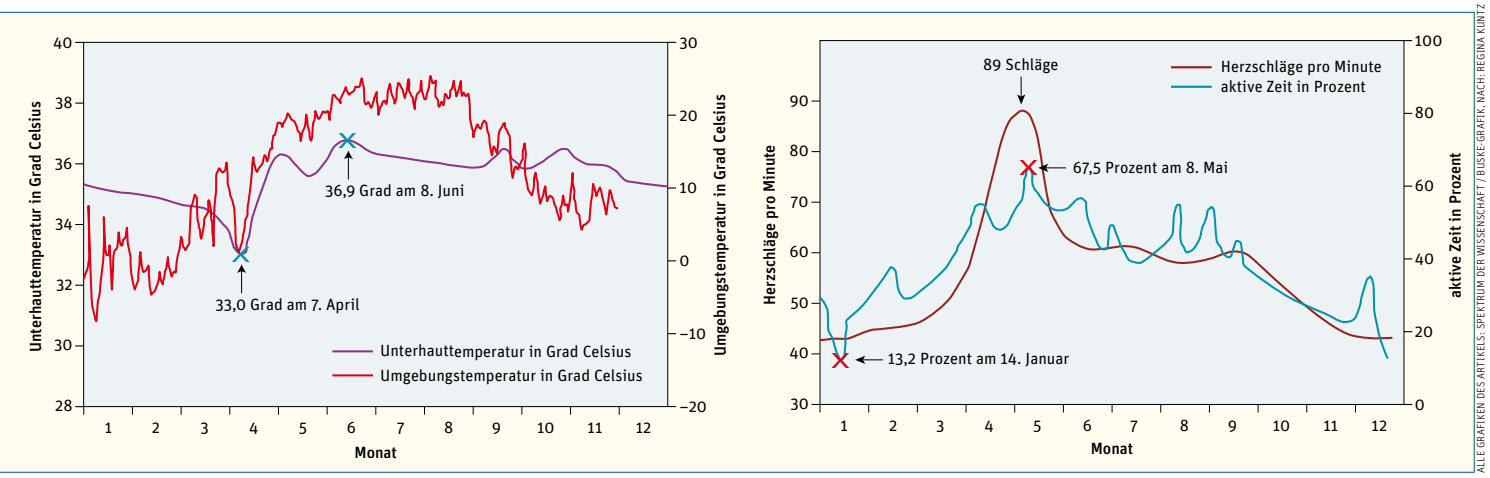
Schon vor 30 Jahren entdeckten Forscher, dass Weißwedelhirsche, Elche, Rehe und Rothirsche im Winter oft wesentlich weniger Energie verbrennen als im Sommer. Mitunter kann der Energieverbrauch sogar um über die Hälfte sinken. Wie das den Tieren gelingt, war aber zunächst nicht klar.

Die Lücke in der Energierechnung

Viele Wissenschaftler nahmen bisher an, die Huftiere würden die Einsparung großenteils schon dadurch erreichen, dass sie möglichst wenig energiezehrendes Verhalten zeigen, zum Beispiel sich weniger bewegen und ihr Fortpflanzungsverhalten einstellen. Schlüssig erschien in dem Zusammenhang auch die Beobachtung, dass manche dieser Huftiere im Winter weniger fressen und dadurch offenbar weniger Energie für Verdauungsprozesse benötigen. Doch in den letzten Jahrzehnten stieg der Verdacht, dass die Energierechnung mit diesen Faktoren allein wohl nicht aufgeht. Was hatte die Fachwelt bisher übersehen?

Zu aller Erstaunen entdeckten Walter Arnold und seine Mitarbeiter vor einigen Jahren bei Rothirschen ein Phänomen, das bei genauerer Betrachtung durchaus an Winter-

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk



ALLE GRAFIKEN DES ARTIKELS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK, NACH: REGINA KUNTZ

Das Verhalten und die erfassten physiologischen Kenngrößen der Pferde (gezeigt sind nur die Tagesmittelwerte für alle Versuchstiere) änderten sich im Jahresverlauf stark.

schlaf erinnert. Im Winter ließen die Hirsche das Äußere ihres Körpers (die Körperschale) während der kalten Nacht- und Morgenstunden auf bis zu 15 Grad Celsius abkühlen. Diese Studie belegte für Huftiere erstmals, dass Veränderungen in der Thermoregulation die drastische Reduktion des Energieverbrauchs im Winter bewirken. Der gedrosselte Zustand hält zwar nicht – wie bei Murmeltieren – über viele Tage an, kann aber mehrere Stunden dauern. Die Hirsche sind dann zwar auch weniger aktiv, doch der verringerte Energiebedarf geht eindeutig auf Einsparungen in der Wärmeproduktion zurück.

Sofort fragten sich die Wiener Forscher, ob vielleicht noch weitere große Pflanzenfresserarten winterkalter Zonen solche Anpassungen besitzen. Manches spricht dafür, dass zumindest andere Wiederkäuer – zu denen auch die Hirsche gehören – über ähnliche Energiesparmechanismen verfügen. Pferde hingegen sind keine Wiederkäuer. Sie gehören sogar zu einer völlig anderen Huftiergruppe. Wie also meistern sie die Herausforderung eines langen Winters? Schließlich waren Artgenossen des Prschewalskipferds in der letzten Eiszeit und noch Jahrtausende danach in Eurasien weit verbreitet. Zwei andere Unterarten, meist Wald- und Steppentarpan genannt, verschwanden endgültig erst im 19. Jahrhundert.

Das Prschewalskipferd erregte in den vergangenen zehn Jahren viel öffentliche Aufmerksamkeit. Seine erfolgreiche Wiederansiedlung in Zentralasien bewerten Zoogärtner als Paradebeispiel für ein gut durchdachtes und geplantes Arterhaltungsprogramm. Diese Geschichte mit ihrem vorläufigen Happy End hätte in einem Hollywoodfilm nicht dramatischer inszeniert werden können.

Reisende in den zentralasiatischen Steppen berichteten zwar schon vor mehreren Jahrhunderten vereinzelt von unbekannten wilden Pferden. Doch als Entdecker der letzten lebenden Unterart des echten Wildpferds gilt der russische General und Asienforscher Nikolai Michailowitsch Prschewalski (1839–1888), der 1878 Schädel und Häute von den Tieren erhielt. Ob er die Wildpferde jemals selbst zu Gesicht bekam, ist umstritten. Kaum 100 Jahre darauf hatte der Mensch auch diese Unterart in freier Wildbahn ausgerottet: Im Jahr 1969 sahen Forscher nach jahrelanger vergeblicher Ausschau das letzte Mal ein solches Wildpferd.

Kampf um das Urwildpferd

Einst waren Prschewalskipferde, die östliche Unterart des Wildpferds, sicherlich viel weiter verbreitet als zur Zeit ihrer Entdeckung. Doch Mitte des 19. Jahrhunderts traten sie nur noch in der chinesisch-mongolischen Grenzregion, in und nahe der Wüste Gobi, auf. Ihr letztes Rückzugsgebiet im 20. Jahrhundert lag in der südwestlichen Mongolei in der Gebirgskette des Tachin-Schara-Nuru (»gelber Bergrücken der Pferde von Prschewalski«).

Als sich unter Tierhaltern und -händlern die Entdeckung von echten Wildpferden in Innerasien herumsprach, wurden bald Expeditionen in die Mongolei und nach China ausgerüstet, um diese Exoten für Zoos und reiche Liebhaber zu fangen. Auch der Hamburger Tierhändler Carl Hagenbeck (1844–1913) konnte in den Jahren 1901 und 1902 einige Prschewalskiperde an mehrere zoologische Einrichtungen in Europa und den USA verkaufen. (Seinen eigenen Zoo in Hamburg gründete Hagenbeck erst 1907.) Vor allem Nachfahren dieser wenigen Tiere bildeten 50 Jahre später den Grundstock für internationale Zuchtprogramme zur Erhaltung dieses Wildpferds.

Ob es wenigstens unter menschlicher Obhut vor dem Aussterben bewahrt werden könnte, blieb lange unsicher. Die Zucht gestaltete sich in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts äußerst frustrierend. Nur sehr wenige Fohlen kamen zur Welt, und die Tiergärtner gewannen erst langsam Erfahrung darin,

In Kürze

- Für den Erhalt ihrer Körpertemperatur bringen Prschewalskipferde im Winter zunehmend weniger Energie auf. Außerdem lassen sie sich besonders im zeitigen Frühjahr in den Morgenstunden stark auskühlen.
- Dazu verfügen die Pferde sowohl über langfristig gesteuerte innere Rhythmen wie über zusätzliche **flexible Anpassungsmechanismen**.
- Die Auskühlungsphasen erinnern an Vorgänge beim Winterschlaf mancher kleineren Säuger. Zuerst hatten Forscher das Phänomen bei Rothirschen nachgewiesen. **Der echte Winterschlaf** könnte lediglich das Extrem einer verbreiteten Anpassungserscheinung vieler warmblütiger Tiere sein.

ihren Pfleglingen artgerechte Haltungs- und Aufzuchtbedingungen zu bieten. Der Zweite Weltkrieg forderte ebenfalls seinen Tribut. Nur 31 Prschewalskipferde überlebten ihn.

Nach diesem Krieg begannen die zoologischen Gärten schließlich, ihre Zuchtbemühungen zu koordinieren, das heißt Tiere gezielt auszutauschen, um der Inzucht so weit wie möglich entgegenzuwirken. Dies geschah durch das Europäische Erhaltungszuchtprogramm EEP, den von amerikanischen Zoos organisierten *Species Survival Plan* SSP sowie das *Australasien Species Management Programm* ASMP in Australien.

Alle heutigen Prschewalskipferde stammen von nur elf Tieren ab. Bis zum Jahr 2007 hatten sie sich dennoch weltweit auf fast 1800 Individuen vermehrt. Somit dürfte diese Unterart des Urwildpferds gerettet sein – quasi im letzten Augenblick.

Das vorerst letzte Kapitel der Erfolgsstory begann in den 1990er Jahren. Nach bis zu 14 Generationen unter menschlicher Obhut wurden die ersten Wildpferde wieder in der Mongolei ausgewildert: zum einen in der dsungarischen Gobi, dem Ursprungsland dieser Pferde, zum anderen in der Zentralmongolei bei Hustai (Khustain) Nuruu. Ein oder zwei Jahre dürfen sich frisch eingeflogene Takhis, wie die Mongolen sie nennen, in einem weitläufigen umzäumten Gelände an die neue Umgebung gewöhnen, danach werden sie frei gelassen. Bisher wurden 180 Pferde ausgewildert. In der kurzen Zeit haben sich diese Gruppen auf 220 Individuen vermehrt. Die Auswilderungsprojekte laufen weiter.

Anlass für unsere Studie war jedoch weniger jene wechselvolle Geschichte. Vielmehr beeindruckte uns, wie angedeutet, die unglaubliche Winterhärte des Urwildpferds, die vor allem Skeptiker des Auswilderungsprogramms überraschte. Selbst Individuen, die bisher nur die vergleichsweise moderaten Verhältnisse in Europa gewohnt gewesen waren, überstanden die

Im Nationalpark Neusiedler See – Seewinkel leben Urwildpferde in einem weiten Gehege mit mehreren Vegetationstypen, das ihnen jederzeit überreichlich Futter bietet. Hier der Bereich »Steppe«

Das falsche Bild vom Winterschlaf

Als typische Winterschläfer gelten unter anderem Murmeltiere, Igel und Feldhamster. Sie fallen während der kalten Monate in einen Zustand, in dem sie stark abkühlen (auf etwa fünf bis zehn Grad Celsius), ihren Stoffwechsel sehr drosseln und erstarren. Ihren geringen Energiebedarf decken sie durch körpereigene Fettreserven. Manche Arten verzehren in Wachphasen zwischendurch zudem angelegte Vorräte.

Die Nichtwinterschläfer, so steht noch in den Schulbüchern, würden dem Frost und Futtermangel mit einem dicken Fell und Speckschichten trotzen, von denen sie auch zehren. Sie würden stets so gut von innen heizen, dass ihre Körpertemperatur ähnlich hoch bleibt wie im Sommer.

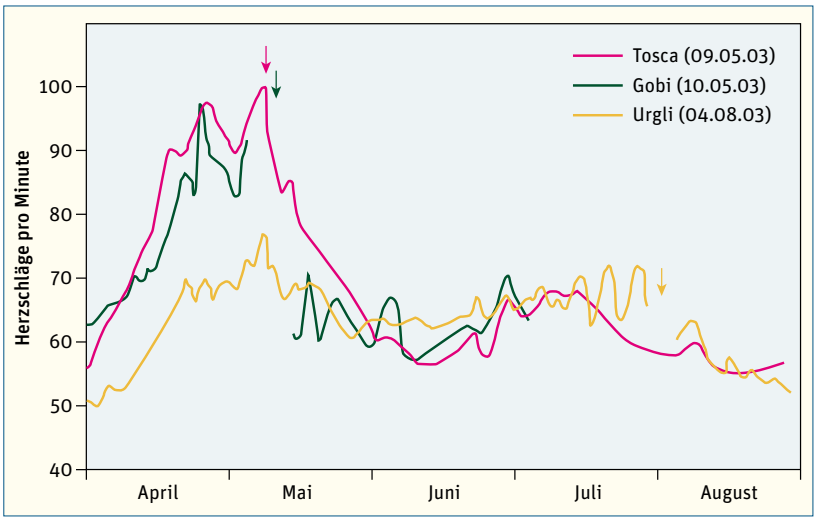
Wie es aussieht, müssen die Lehrbücher umgeschrieben werden. Nach Auffassung des Wildtierkundlers Walter Arnold von der Veterinärmedizinischen Universität Wien handelt es sich beim echten Winterschlaf nur um die Extremform weit verbreiteter physiologischer Anpassungen an jahreszeitlich bedingte harsche Umweltverhältnisse. Dass auch Rothirsche ihre Körpertemperatur im Winter phasenweise um etliche Grad drosseln und dadurch viel Energie einsparen, wiesen Arnold und sein Team schon vor mehreren Jahren nach. Nun zeigt sich: Prschewalskipferde machen das ebenfalls.

Die beiden Arten gehören zu unterschiedlichen Gruppen von Großsäugern. Handelt es sich bei dem Phänomen etwa um eine grundsätzliche Eigenschaft von Säugetieren? Bei den Huftieren

Ein mit Halsband und Sender ausgestattetes Pferd der Studie

dauern die Auskühlungsphasen jeweils nur wenige Stunden. Deswegen fällt die Körpertemperatur weniger stark ab als bei echten Winterschläfern. Immerhin betrug der niedrigste gemessene Unterhautwert für die Hirsche 15 Grad, für die Pferde 24,4 Grad Celsius. Derzeit untersuchen Forscher des Wiener Instituts das Phänomen beim Alpensteinbock, der insbesondere im Winter ein extremes Dasein fristet und mit Energie streng haushalten muss.

Doch ähnliche physiologische Reaktionen sind offenbar auch im Sommer möglich, wie eine Studie an in Wüsten lebenden Kropfgazellen belegt. Sie haben in heißen Nächten eine niedrigere Körpertemperatur als in Winternächten, wodurch sie weniger Wasser verlieren.



Im Frühjahr stieg die Herzschlagrate dreier Stuten stark an – auch die der Stute Urgli, die ihr Fohlen erst im August bekam. (Die Pfeile zeigen jeweils das Datum des Abfohlens.)

extremen mongolischen Winter von Anfang an offenbar nahezu problemlos. Sogar mit dem äußerst spartanischen Futterangebot in der kalten Jahreszeit schienen sich die Takhis gleich zu arrangieren. Wir wollten herausfinden, welche Anpassungsmechanismen ihnen dabei helfen.

Die kleine Herde am Neusiedler See bot für solche Studien recht ideale Voraussetzungen. In einem etwa 300 Hektar (drei Quadratkilometer) großen Gehege leben dort meist um die neun Tiere schon seit Jahren halbwild – ein erwachsener Hengst, einige Stuten, jeweils auch ein paar Fohlen. Das Gelände grenzt an das Seeufer, und die Pferde erhalten auch im Winter kein zusätzliches Futter. Dennoch sind sie zahm genug, um sich an Menschen nicht weiter zu stören und sie nahe an sich heranzulassen. Unsere Studien erfolgten vom Mai 2002 bis Anfang 2004. Von insgesamt sieben Tieren dieser Herde gewannen wir möglichst fortlaufend verschiedene Arten von Daten.

Beispielsweise registrierten wir, wie viel die Pferde im Tages- wie Jahresverlauf überhaupt aktiv waren. Dazu trugen sie ein Halsband mit einem Erschütterungssensor, der Tag und Nacht ansprach, wenn sich das Tier bewegte. Ein Mikrokontroller zählte fortlaufend jeweils zwei Minuten lang alle aktiven Sekunden des Tiers. Der daraus ermittelte Prozentwert wurde dann telemetrisch zusammen mit weiteren Informationen zu einer Empfangsstation am Gehegerand gesendet.

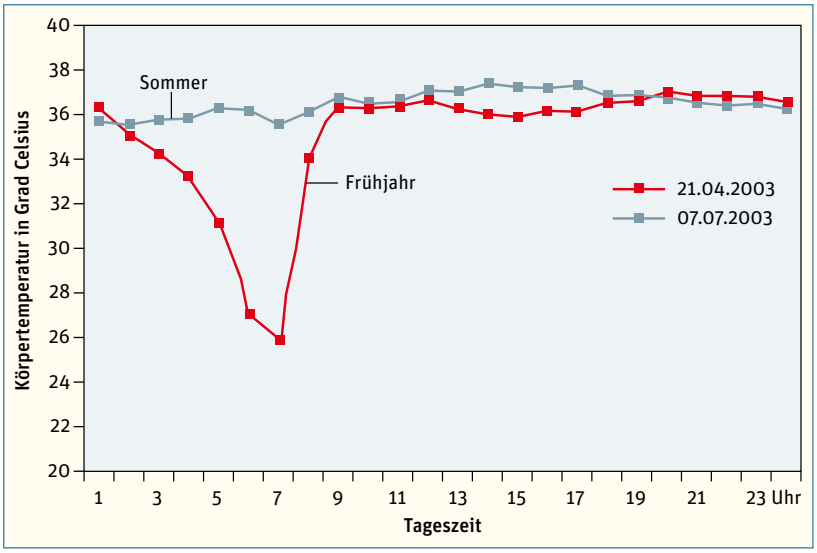
Tatsächlich fanden wir im Aktivitätsverhalten ausgeprägte jahreszeitliche Unterschiede. Im Winter ließen es die Wildpferde ausgesprochen ruhig angehen. Sie bewegten sich in der Wintermitte – in den kältesten Monaten – durchschnittlich nur halb so viel wie im Sommer, gerade einmal 23 Prozent des Tages. Offensichtlich sparten sie grundsätzlich an Bewegung und der dafür erforderlichen Energie. Handelte es sich bei den eingesparten sechs Stunden womöglich um Zeit, welche die Pferde im Sommer mit Fressen zubringen? Schon die Nahrungsaufnahme allein verbraucht schließlich Energie, desgleichen der Verdauungsprozess.

Ein erheblicher Teil unserer Studien galt deswegen dem Fressverhalten sowie der Nahrungsverwertung. Vor allem wollten wir wissen, welche Nahrungsmengen die Pferde in den einzelnen Jahreszeiten zu sich nahmen, wie sie ihren Speiseplan über das Jahr hinweg zusammenstellten, und ob sie das jeweils verfügbare Futter im Winter besser oder schlechter verdauten als zu anderen Zeiten. Antworten darauf gaben Kot- und Pflanzenuntersuchungen. Erstmals bei Pferden wendeten wir hierfür die so genannte n-Alkanmethode an, ein relativ neues Verfahren der Ernährungsforschung. Pflanzenzellen tragen in den Schichten um ihre Zellwände unverdauliche Wachse, so genannte Alkane. Die n-Alkane sind gesättigte Kohlenwasserstoffe – Moleküle, die also nur aus Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen. Die Länge der Kohlenstoffkette kann variieren.

Pflanzen enthalten überwiegend ungeradzahlige n-Alkane – was für solche Studien praktisch ist. Typischerweise handelt es sich um Moleküle mit zwischen 25 und 35 Kohlenstoffatomen. Die Ernährungsforschung macht sich zu Nutze, dass jede Pflanzenart eine charakteristische Kombination davon aufweist – quasi ihr Fingerabdruck. Der Forscher kann durch Analyse der Alkane im Kot herausfinden, welche Pflanzen das Tier zu welchen Anteilen gefressen hat.

Doch uns interessierte auch, wie viel die Pferde in den verschiedenen Jahreszeiten vertilgten, und wie gut sowie in welcher Zeit sie das Futter jeweils aufschlüsselten. Darum verfütterten wir einigen Stuten an bestimmten Tagen in einem festgelegten Zeitraum mehr-

So unterschiedlich sieht eine typische Temperaturkurve – hier von der Stute Urgli – an einem Frühjahrs- beziehungsweise Sommertag aus.



mals einzelne kleine Brotstückchen, die wir mit einem geradzahligen Alkan versetzt hatten, das in Pflanzen nicht vorkommt. Dieses Alkan diente uns als Marker. Wir verfütterten es übers Jahr verteilt an sechs Tagen. 18 bis 24 Stunden später sammelten wir Kotproben ein. Darin fanden wir den größten Teil des verabreichten geradzahligen Alkans wieder. Hierdurch konnten wir mehreres ermitteln.

Erstens erlaubte die Verdünnung des Markers im Kot, genau genommen der über mehrere Proben im Verhältnis zur verabreichten Dosis etwa gleich bleibende Wert, Rückschlüsse auf die gesamte Kotmenge des Untersuchungstags. Auch konnten wir feststellen, wie lange der Marker benötigte hatte, den Verdauungstrakt zu passieren, also wie schnell oder langsam die Nahrung verdaut wurde.

Zweitens beobachteten und protokollierten wir rund um die Versuchstage, was diese Pferde an den entscheidenden Tagen vorwiegend fraßen. Jene Pflanzen sammelten wir und bestimmten die arttypischen Alkanmuster. Das Muster in den Kotproben zeigte uns anschließend, welche Pflanzen bei den Pferden gerade hoch im Kurs standen. Außerdem ermittelten wir die Verdaulichkeit des Futters, indem wir von einem Gemisch der am häufigsten gefressenen Pflanzen die Konzentration bestimmter Alkane maßen und mit der Konzentration im Kot verglichen. Aus der Kotmenge und der Verdaulichkeit der Nahrung errechneten wir schließlich die Pflanzenmenge, die das Pferd in diesen 24 Stunden geweidet hatte.

Motto: fett in den Winter

Schon äußerlich war deutlich zu sehen, dass sich die Pferde den Sommer und Herbst über dicke Bäuche und Fettrollen zulegten – nach dem Motto: möglichst fett in den Winter. Die Pferde mästeten sich während der Vegetationsperiode mit reichlich vorhandenen proteinreichen, leicht verdaulichen Gräsern der Salzsteppe und besonders gern mit dem frischen Schilf des Uferbereichs. Wie viele andere Säugetiere zehrten sie in der kargen Zeit von ihrer Speckschicht, die folglich am Winterende wieder verschwunden war. Mit einer tragbaren Waage konnten wir unsere Versuchstiere ein paarmal wiegen. Manche von ihnen verloren über den Winter 60 Kilogramm.

Ihr Verhalten in der kalten Jahreszeit verblüffte uns. Pferde sind keine Wiederkäuer, sondern schlüsseln die Pflanzenzellen in ihrem Blind- und Dickdarm auf – Abschnitte, die große Mengen solcher Nahrung aufzunehmen vermögen. Deswegen könnten diese Tiere ein für die Winterzeit typisches minderwertiges Futterangebot im Prinzip dadurch ausgleichen, dass sie nun umso reichlicher die schwer verdauliche, faserreiche Nahrung zu sich nehmen. Diese müsste außerdem besonders lange im Darm verweilen, damit die dort ansässigen Kleinstlebewesen (Zellulosebakterien) genügend Zeit haben, die harten Teile der Pflanzenzellen gründlich zu zersetzen.

Tatsächlich fanden wir, dass das Futter im Winter länger im Darm blieb. Offensichtlich arbeitete der Verdauungstrakt träger als im Sommer. Allerdings fraßen die Pferde jetzt keineswegs besonders viel. Im Gegenteil, rein an Masse (Trockenmasse) vertilgten sie nun sogar deutlich weniger. Während sie in den anderen Monaten durchschnittlich an Trockenmasse fast elf Kilogramm pro Tag aufnahmen, kamen sie im Winter nur auf rund sieben. Den größten Appetit entwickelten die Pferde im Spätherbst, kurz vor Wintereintritt. Wir errechneten jetzt Spitzenwerte von bis zu 15 Kilogramm gefressene Trockenmasse.

Dabei hätte das weitläufige Gelände am Neusiedler See auch im Winter mehr als genug Nahrung geboten. Selbst bei Schnee waren die Grashorste meist schnell frei geweht. Unser Befund weckte den Verdacht, dass Wildpferde womöglich in kalten Zeiten einiges an Energie schon dadurch einsparen, dass sie nun schlicht nicht so viel fressen wie in guten Monaten. Gleichzeitig optimieren sie den Aufschluss der Nahrung durch eine langsamere Darmpassage. Wir stellten fest, dass unsere Studientiere im Winter gerade Pflanzenfasern relativ gut verwerteten. Interessanterweise galt Gleiches nicht für den Proteinanteil. Offensichtlich vermochten die Pferde im Winter dem Futter nur bedingt Protein zu entnehmen. Wir vermuten, dass wilde Pflanzenfresser in diesen Monaten weit gehend auf die Eiweißverdauung verzichten, weil es sich für sie bei den geringen Proteinmengen in der Winternahrung nicht lohnt, die zu deren Transport erforderlich Strukturen in den

Am meisten fressen die Pferde in der Vegetationsperiode. Die Stute Gobi (unten) ist im Frühjahr abgemagert, im Herbst bestens genährt – und nicht etwa trächtig.

Sobald die ersten Schilfhalme sprießen, zieht es die Pferde in den breiten Schilfgürtel des Geheges am Neusiedler See.

Darmzellen zu unterhalten. Dagegen sparten die Pferde im Sommer offenbar großenteils den Aufwand ein, Rohfaser aufzuschlüsseln. Sie nutzten jetzt bevorzugt das reichlich vorhandene und rasch verdaubare Roheiweiß. Und weil die Nahrung nun schneller durch den Darm wanderte, vermochten sie insgesamt mehr Futter aufzunehmen.

Das gesamte Ausmaß des winterlichen Ernährungsverhaltens unserer Studienpferde verstanden wir jedoch erst durch die Ergebnisse einer parallel laufenden Untersuchung. Wir maßen kontinuierlich Herzschlagrate und Körpertemperatur, genau genommen die Temperatur der Unterhaut. Wir erfassten beides mit Hilfe nur streichholzschachtelgroßer Telemetriesender, die im Brustbereich unter die Haut implantiert waren (siehe Bild, Kasten S. 49). Ehe die Daten die Empfangsstation erreichten, wurden sie zum Halsband des Tiers gesendet und dort verstärkt. So konnten wir das ganze Jahr über quasi ins Innere der Tiere blicken.

Die Herzschlagrate beziehungsweise Herzfrequenz werten Stoffwechselphysiologen als ein recht brauchbares Indiz für die Stoffwechselaktivität und damit den Energieverbrauch. Die Frequenz des Herzschlags änderte sich im Verlauf der Jahreszeiten extrem. Mit Abstand am langsamsten schlägt das Herz eines Prschewalskipferds im Winter. Im Dezember und Januar verzeichneten wir nur durchschnittlich 44 Schläge pro Minute. Im Sommer pendelte sich der Tagesdurchschnitt auf 60 bis 70 Schläge pro Minute ein. Doch die höchste Herzaktivität registrierten wir mit durchschnittlich 89 Schlägen pro Minute im späten Frühjahr, Anfang Mai. Es sah geradezu aus, als würden die Pferde mit dem Beginn der Vegetationsperiode nun alle Wintermüdigkeit abschütteln und ihren Stoffwechsel rasch wieder auf Hochtouren bringen – fast wie ein explosionsartiges Frühlingserwachen.

Umständehalber hatten wir die Frühjahrsmessungen nur bei Stuten durchführen können. Da viele Fohlen im späten Frühjahr oder Frühsommer zur Welt kommen, könnte man erwarten, dass die Stuten so kurz vor der Geburt wie auch wegen der Milchproduktion in den ersten Monaten danach einen besonders hohen Energieumsatz haben und sich dies in unseren Daten niederschlägt. Zwar fanden wir bei zwei Stuten, die Anfang Mai fohlten, relativ den höchsten Anstieg der Herzfrequenz. Aber den eindrucksvollen Peak der Herztätigkeit zeigte auch ein Tier, das erst im August sein Fohlen bekam (Grafik S. 50 oben).

Besonders gespannt waren wir auf die Körpertemperaturdaten. Die über den Tag gemittelte Unterhauttemperatur sank von November an immer mehr. Allerdings beobachteten wir die tiefsten Werte keineswegs in der Wintermitte und damit in der kältesten Zeit, sondern zu Beginn des Frühjahrs, als die Außentemperaturen längst anstiegen. Im Sommer maßen wir eine mittlere Unterhauttemperatur von gut 36 Grad Celsius. Anfang April, sozusagen am Tiefstpunkt, betrug sie dagegen nur mehr 33 Grad (Grafik S. 48, links).

Interessanterweise blieb der Wert im Tagesverlauf nicht etwa ungefähr gleich, sondern folgte mehr oder weniger einem Tagesrhythmus. Hauptsächlich in den frühen Morgenstunden kühlte die Körperschale oft über Stunden hinweg stark ab. Gleichzeitig verringerte sich die Pulsrate – ein Indiz, dass die Tiere im unterkühlten Zustand weniger Energie verbrauchten. Diese Auskühlungsphasen konnten wir das ganze Jahr über feststellen, besonders ausgeprägt traten sie jedoch im Spätwinter auf. Als niedrigsten Wert am frühen Morgen registrierten wir bei einer Stute 24,4 Grad. Die längste Phase mit einer Temperatur unter 32 Grad betrug mehr als neuneinhalb Stunden.

Flexible Sparprogramme

Allmählich zeichnet sich für uns von der Überlebensstrategie des Prschewalskipferds ein Gesamtbild ab. Urwildpferde verbrauchen im Winter weniger Energie, indem sie ihre Aktivität stark herabsetzen und nicht so viel Körperwärme produzieren. Ihr Stoffwechsel wird dadurch um 50 Prozent heruntergefahren. Ähnlich wie Rothirsche zeigen auch diese Tiere ausgeprägte Auskühlungsphasen. Charakteristisch dafür ist, dass die Unterhauttemperatur, die Pulsrate und die Aktivität zurückgehen. Das erinnert an eine milde Form von Winterschlaf. Bei beiden Arten sind die Auskühlungsphasen im Spätwinter am ausge-

HAUSPFERDE

- In der Nacheiszeit war das Wildpferd *(Equus ferus)* von Mitteleuropa bis Zentralasien verbreitet. Nach molekulargenetischen Studien wurden Pferde in mehreren Regionen Eurasiens aus verschiedenen lokalen Unterarten domestiziert.
- Die Forscher haben Indizien dafür, dass ein versteckter Winterschlaf auch bei Hauspferden auftreten kann, insbesondere bei relativ ursprünglichen Rassen.

prägtesten – ein zusätzlicher Beweis, dass die geringen Unterhauttemperaturen nicht einfach eine Folge der Kälte sind, sondern ein aktives Absenken der Körpertemperatur widerspiegeln. Winterschlafähnliche Reaktionen hatten Physiologen bei diesen Säugergruppen bisher nicht erwartet. Nun konnten wir sie für eine weitere Gruppe von großen Pflanzenfressern nachweisen.

Walter Arnold vermutet, dass Säugetiere grundsätzlich dazu fähig sind, auf solche Weise Energie einzusparen, wenngleich in unterschiedlichen Graden. Der Winterschlaf von Murmeltieren und anderen kleinen Säugern bildet seines Erachtens nur ein Extrem. Die so genannten echten Winterschläfer überdauern die kalte Jahreszeit mit einer fast durchgehend sehr niedrigen Körpertemperatur von etwa fünf bis zehn Grad Celsius, einem drastisch heruntergefahrenen Stoffwechsel und erstarrter Muskulatur. Dennoch verhalten sich selbst diese Arten recht unterschiedlich. So sind ihre Schlafphasen verschieden lang. Auch fressen Hamster, wenn sie wach sind, ihre Vorräte, während Murmeltiere den ganzen Winter über fasten.

Bei Rothirschen und Prschewalskipferden sind die Auskühlungsphasen weniger ausgeprägt und daher von außen nicht wahrnehmbar. Wir sprechen deswegen auch von einem heimlichen oder verborgenen Winterschlaf. Wie unsere Studien zeigten, halten die Pferde solche Winterschlafstunden allerdings nicht nur im Winter. Wieso aber erscheint das Phänomen bei beiden Arten gerade zu Beginn des Frühjahrs am ausgeprägtesten? Wir nehmen an, dass der innere Mechanismus insbesondere dann anspringt, wenn der Körper herausgefordert wird. Offensichtlich sind die letzten Winter- und ersten Frühjahrstage für ein abgemagertes Pferd besonders kritisch. Um sie zu überstehen, muss es noch sparsamer mit seinen Kräften haushalten als vorher.

Demnach handelt es sich beim heimlichen Winterschlaf um ein flexibles Energiesparprogramm, das Wildtiere in kritischen Phasen einsetzen, um allzu große, lebensbedrohliche Energieverluste zu verhindern. Je nach Körperzustand scheinen die Tiere das Ausmaß des Energiesparens zudem variieren zu können. Wie Forscher nun zunehmend erkennen, reagieren viele Arten in solcher Weise durchaus nicht nur auf Kälte oder winterbedingten Futtermangel, sondern oft auch auf völlig andere Lebensbedingungen – etwa wenn es im heißen Klima wenig Futter oder Wasser gibt (siehe Kasten S. 49).

Wir wissen nun auch, weshalb die Pferde unserer Studie im Winter weniger fressen: Sie können sich das leisten – zum einen, weil sie sich vorher monatelang ihr eigenes Energiedepot angelegt haben, zum anderen, weil sie jetzt relativ wenig Energie verbrauchen.

Wie mag es den Wildpferden gelingen, sich rechtzeitig auf die Jahreszeiten einzustellen? Unseres Erachtens folgen sie dabei einem inneren – endogenen – Rhythmus, der sich an der Tageslänge orientiert. Sie schalten sozusagen auf ein Winter- beziehungsweise Sommerprogramm um. Das Sommerprogramm schreibt ihnen vor, viel zu fressen, schnell zu verdauen und Fettdepots anzulegen. Das Winterprogramm verordnet viel Ruhe und Energiesparen. Der Stoffwechsel läuft dann auf Sparflamme, auch die Verdauung dauert nun länger. Faktoren wie die Nahrungsqualität können solches Verhalten dennoch beeinflussen. So erhöht proteinreiches Futter den Appetit.

Von den echten Winterschläfern wissen Forscher seit Langem, dass sie ihre Verdauungsorgane dem Bedarf der Jahreszeit anpassen. Auch die Prschewalskipferde müssen sich vermutlich entsprechend auf den Sommer oder Winter einstellen. Das erfordert komplexe hormonell gesteuerte Umbaumaßnahmen. Besonders drastische innere Veränderungen dürften sich bei den Pferden Mitte Mai abspielen, wenn der Stoffwechsel zum Frühjahrspeak auf Hochtouren läuft. Wahrscheinlich müssen sie am Beginn der Vegetationsperiode die im Winter vernachlässigten Organe regenerieren, vor allem den Darm. Das erfordert eine Menge Extraenergie.

Prschewalskipferde bestehen die extremen Jahreszeiten, vor allem die kalten Winter, in ihrer wiedergewonnenen asiatischen Heimat mit einer Palette an Energiesparmechanismen. Es bleibt zu hoffen, dass sich ihr wechselvolles Schicksal weiterhin so erfolgreich entwickelt wie in den letzten Jahren. ◁

Einige Wochen später hat sich der Schilfgürtel geradezu in ein Schlaraffenland verwandelt.

Regina Kuntz untersuchte an der Veterinärmedizinischen Universität Wien mit einem Forscherteam den Energiehaushalt von Wildpferden und promovierte dort über das Thema. Heute arbeitet sie unter anderem an der Universität Freiburg und als Gymnasiallehrerin.

Arnold, W. et al.: Nocturnal Hypometabolism as an Overwintering Strategy of Red Deer *(Cervus elaphus)*. In: American Journal of Physiology 286, R174 – R181, 2004.

Kuntz, R. et al. / Arnold, W. et al.: Seasonal Adjustment of Energy Budget in a Large Wild Mammal, the Przewalski Horse *(Equus ferus przewalskii)*. I. Energy Intake. / II. Energy expenditure. Beides in: The Journal of Experimental Biology 209, S. 4557 – 4565 bzw. S. 4566 – 4573, 2006.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/960475.

Im Wechselbad des Klimas

Die Temperaturen von Atlantik und Pazifik schwanken im Verlauf von Jahrzehnten – mit weit reichenden Auswirkungen. Die rätselhaften Oszillationen könnten vorübergehend sogar die global Erwärmung aufhalten.

In Kürze

- Das **irdische Klimasystem** erweist sich als noch komplexer als vermutet. So haben Forscher großräumige Fluktuationen über Zeiträume von Jahrzehnten hinweg entdeckt.
- Die heute üblichen langfristigen Klimaprojektionen tragen diesen **kurzzeitigen Phänomenen** nur ungenügend Rechnung; denn die dafür nötige Simulation von Meeresströmungen ist noch zu grob.
- Jüngste Versuche, die **aktuellen Oberflächentemperaturen der Ozeane** in kurzfristige Klimaprognosen einzubeziehen, deuten darauf hin, dass die globale Erwärmung in den nächsten zehn Jahren eine Pause einlegen könnte.

Von Sven Titz

Mitte der 1990er Jahre untersuchten Forscher an der University of Washington in Seattle das Vorkommen von Lachsen im Pazifik – und wunderten sich. Die Daten zeigten ein merkwürdiges Auf und Ab. Aktenkundig sind die Schwankungen ab dem Jahr 1915: Damals freuten sich die Fischer am Columbia River im Nordwesten der USA über den besten Lachsfang seit Langem. Zur gleichen Zeit erlebten ihre Kollegen in Alaska 2700 Kilometer weiter nordwestlich eine Enttäuschung. Die Lachse, die gewöhnlich massenhaft in den Netzen zappelten, machten sich in diesem Jahr rar. 1939 war die Situation dann umgekehrt: Während man sich in Alaska vor Lachsen kaum retten konnte, gab es am Columbia River fast einen Minusrekord. In der Folge schwang das Pendel jedoch wieder auf die andere Seite: 33 Jahre später kehrten die Lachse in Schwärmen zum Columbia River zurück.

Zwei Ozeane – zwei Oszillationen

Handelte es sich bei diesen Ereignissen um Zufall oder steckte etwas Größeres dahinter? Der Fischereiexperte Robert Francis sowie die Klimaforscher Nathan Mantua und John Wallace hegten eine Vermutung. Sie verglichen die Fangstatistiken und weitere meeresbiologische Daten mit Klimaaufzeichnungen und zogen einen weit reichenden Schluss: Im Pazifik schien es eine noch unbekannte Klimaschwankung zu geben, die innerhalb weniger Jahrzehnte von dem einen in den anderen Zustand kippt. Diese Schwankung erhielt den Namen »Pazifische Dekadenoszillation« (kurz PDO). Das wissenschaftliche Interesse daran ist seitdem Jahr für Jahr gewachsen. Der Fachwelt wird immer klarer, dass sich die Entwicklung des Weltklimas kaum verstehen lässt, wenn Fluktuationen wie die im Stillen Ozean außer Acht bleiben.

Die PDO bezieht sich primär auf Schwankungen der Oberflächentemperaturen im Nordpazifik. Klimaforscher ermittelten ein Muster, das sich ungefähr alle zehn Jahre in sein Gegenteil verkehrt (siehe Grafik auf S. 56 oben). Ihm ist eine längerfristige Schwingung mit einer Periodendauer von 50 bis 70 Jahren überlagert. In welcher Phase sich die Oszillation befindet, erkennt man an den Wassertemperaturen im tropischen Pazifik: Sind sie höher als sonst, handelt es sich um die positive, bei unterdurchschnittlichen Werten um die negative PDO-Phase.

Die Lachse reagieren auf die Schwankungen, weil sich mit den Meerestemperaturen auch der Nährstoff- und Planktongehalt des Wassers ändert. Doch nicht nur das Wohlergehen von Fischschwärmen ist betroffen. Auch der Luftdruck und damit verbundene Zirkulationsmuster in der Atmosphäre werden von der Oszillation durch den Austausch von Wärme und Feuchtigkeit an der Meeresoberfläche beeinflusst. Eine negative PDO-

DON MACE / ISTOCKPHOTO

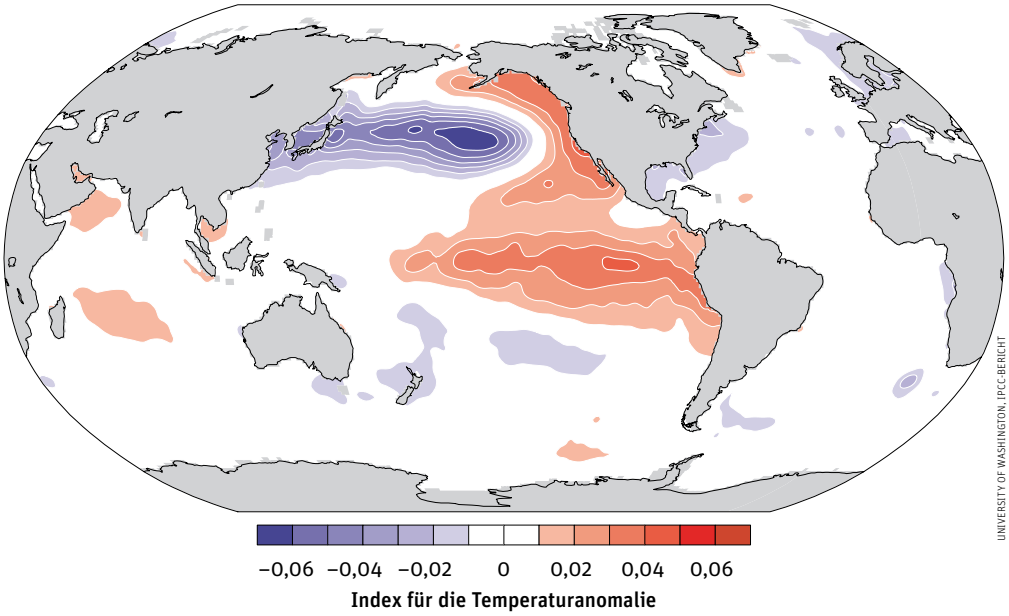
Einen solchen Lachsreichtum gibt es im Westen der USA nicht jedes Jahr. Schwankungen in der Menge der Fische waren ein erstes Indiz für einen Klimazyklus im Pazifik, der heute als Pazifische Dekadenoszillation bezeichnet wird.

Phase geht zum Beispiel mit starken winterlichen Dürreperioden im Süden der USA einher, während im Nordwesten des Landes mehr Schnee fällt als gewöhnlich.

Für die Trockenphasen in den USA sind allerdings nicht ausschließlich Vorgänge im Pazifik verantwortlich – auch der Atlantik spielt eine wichtige Rolle. Das zweitgrößte Weltmeer unterliegt nämlich gleichfalls langfristigen Klimaschwankungen. Hinweise darauf gab es schon vor Jahrzehnten. Aber erst im Juni 2000 erhielt das Phänomen eine feste Bezeichnung. Nachdem mehrere Studien starke Indizien für die Existenz des PDO-Gegenstücks geliefert hatten, prägte der Wissenschaftsjournalist Richard Kerr in einem »Science«-Artikel dafür den Ausdruck »Atlantische Multidekadische Oszillation« (kurz AMO). Sie pendelt mit einer Periodendauer von 50 bis 80 Jahren und ist wie ihr pazifisches Pendant am Temperaturmuster der Meeresoberfläche zu erkennen (siehe Grafik S. 57 oben). Ein ungewöhnlich warmer Nordatlantik entspricht einer positiven, ein kalter einer negativen AMO-Phase. An paläoklimatologischen Daten lässt sich ablesen, dass das Klimapendel schon seit mindestens tausend Jahren auf ähnliche Weise schwingt.

Wie die Oszillation im Pazifik verändert auch die AMO die Witterung auf den Kontinenten. Sie beeinflusst zum Beispiel, wie stark es in der Sahelzone und im Nordosten Brasiliens regnet. Darauf deuten Klimasimulationen von Forschern um Jeff Knight am Hadley Centre for Climate Change in Exeter (England) hin. Die Dürreperioden in Nordafrika in den 1970er und 1980er Jahren könnten auf eine negative Phase der AMO zurückzu-

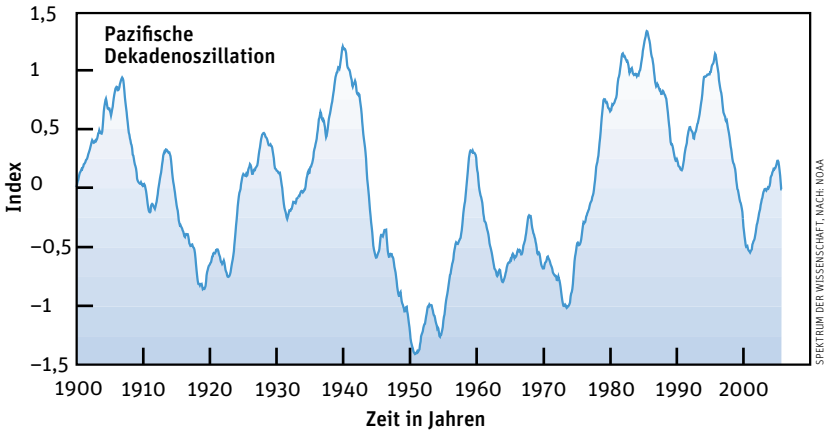
Das Auf und Ab der Pazifischen Dekadenoszillation lässt sich an den Temperaturen der Meeresoberfläche erkennen. In der hier gezeigten positiven Phase ist der Pazifik im Nordwesten kälter als sonst und im tropischen Bereich wärmer. Während der negativen Phase verhält es sich genau umgekehrt.



führen sein. Sogar auf das Sommerwetter in Europa wirkt sich die Oszillation vermutlich aus. So ist der »Jahrhundertsommer« von 2003 wohl zum Teil der positiven AMO-Phase zuzuschreiben, die bis heute anhält. Es gibt auch ein ganz aktuelles Beispiel: Im Juni dieses Jahres lagen die Temperaturen an der Oberfläche von Nord- und Ostsee um bis zu drei Grad Celsius über dem langjährigen Mittelwert. So groß waren die ozeanischen Wärmeanomalien nirgends sonst auf der Erde.

Vielleicht reicht der Einfluss der Klimaschwankung sogar bis zum Nordpol und nach Indien. Einige Polarexperten vermuten auf der Basis historischer Aufzeichnungen, dass der Rückgang des arktischen Meereises in den letzten Jahren durch eine positive AMO-Phase bedingt ist. Demnach bringt warmes Atlantikwasser die Eisschollen zum Schmelzen. Andere Forscher glauben, dass selbst der ferne indische Monsun auf den Zustand der atlantischen Oszillation reagiert. Ihnen zufolge intensiviert eine positive AMO-Phase die Regenfälle.

Der Index, der die Pazifische Dekadenoszillation charakterisiert, pendelt unregelmäßig (Glättung: Fünfjahresmittel). Besonders ausgeprägt war die negative Phase zwischen 1947 und 1976.



Umstrittener ist ein Effekt, der die tropischen Wirbelstürme betrifft. Einige Wissenschaftler sind der Ansicht, der jüngste positive Trend der AMO habe das Entstehen von Hurrikanen im Atlantik begünstigt. In den 1970er Jahren brausten pro Jahr im Durchschnitt fünf dieser Zyklone über den Ozean; 30 Jahre später waren es fast doppelt so viele.

Der Princeton-Forscher Thomas Delworth sieht in der AMO die Hauptursache für den Wandel. Andere Experten – etwa Kevin Trenberth vom National Center for Atmospheric Research in Boulder – widersprechen. Sie verweisen darauf, dass die globale Erwärmung durch Treibhausgase wie Kohlendioxid und Methan die Verdunstung und damit Wolkenbildung fördert. Diese Kausalkette spreche für einen starken Einfluss des Menschen auf die Hurrikane. Das Ende der Debatte ist noch nicht abzusehen (siehe »Wärmere Meere – stärkere Hurrikane« von Kevin Trenberth, Spektrum der Wissenschaft 9/2007, S. 34, sowie »Wirbelstürme im Aufwind« von Mark Alpert, Spektrum der Wissenschaft 1/2005, S. 19).

Ob die AMO die Hurrikane nun beeinflusst oder nicht – mit der Erwärmung des Nordatlantiks könnte es fürs Erste vorbei sein. Das geht aus einer Studie hervor, die Anfang Mai viel Aufsehen erregte. Noel Keenlyside und Mojib Latif vom Kieler Leibniz-Institut für Meeresforschung erprobten zusammen mit drei Kollegen vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg eine neue Methode der Klimavorhersage, bei der sie stärker als bisher die gemessenen Temperaturen der Meeresoberfläche berücksichtigten.

Auf dieser Basis prognostizierten die Forscher einen Abschwung der AMO; er werde die Erwärmung, die auf Grund des verstärk-

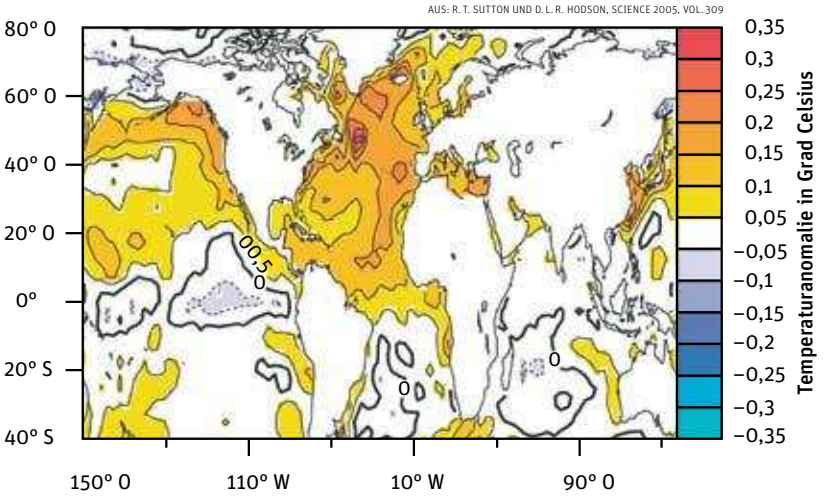
ten Treibhauseffekts zu erwarten ist, in der nahen Zukunft mehr als ausgleichen. Die Durchschnittstemperatur der Jahre 2005 bis 2015 sollte deshalb niedriger liegen als die der Periode 1994 bis 2004. Das gelte vor allem für Westeuropa und Nordamerika. Auch die weltweite Mitteltemperatur würde erst gegen Ende des kommenden Jahrzehnts wieder deutlich ansteigen. Für die nächste Zeit erwarten die Autoren der Studie daher keine neuen Hitzerekorde.

Für ihre Prognose versuchten Keenlyside und seine Kollegen den Schwung von Klimaoszillationen wie der AMO und der PDO genauer zu berücksichtigen, als das bisher geschah. In herkömmlichen Computersimulationen, wie Forschergruppen auf der ganzen Welt sie etwa für den Klimarat der Vereinten Nationen (International Panel on Climate Change, kurz IPCC) anfertigen, existieren diese Schwankungen zwar in irgendeiner Form auch. Nur haben sie mit dem aktuellen Zustand des Klimasystems weniger zu tun, als man gemeinhin denken würde.

Das liegt zum einen daran, dass Informationen über die Veränderungen in den tieferen Ozeanschichten noch dürftig sind. Außerdem war es bislang unmöglich, aktuelle Messwerte, etwa von Bojen im Ozean, in die Computerprogramme für langfristige Klimasimulationen direkt einzuspeisen. Die Modelle würden verrückt spielen, wenn man das versuchte, sagt Keenlyside. Sie sind derzeit noch nicht detailliert genug und werden deshalb so programmiert, dass der durchschnittliche Zustand des Modellklimas und seine Schwankungsbreite ungefähr der Wirklichkeit entsprechen.

Mit Hilfe eines Verfahrens aus der langfristigen Wettervorhersage gelang es den Forschern aus Kiel und Hamburg nun jedoch, die aktuellen Oberflächentemperaturen der Ozeane in die Simulationen einzubeziehen. Sie konnten sich dabei an einem britischen Vorbild orientieren: Ein Team um Doug Smith vom Hadley Centre hatte im vergangenen Jahr eine ähnliche Arbeit publiziert. Es ließ noch mehr Messdaten in seine Berechnungen einfließen als Keenlyside und prognostizierte ebenfalls eine, wenn auch kürzere Pause der globalen Erwärmung. Unter Fachkollegen gelten die beiden Studien als kühne Versuche am äußersten Rand dessen, was mit Klimamodellen heute möglich ist.

Was treibt die Oszillationen an und wie laufen sie ab? Darüber sind sich Klimaforscher noch keineswegs im Klaren. Am letzten großen IPCC-Report von 2007 lässt sich ablesen, wie gering der Kenntnisstand ist. Er widmet der PDO und AMO zusammen nur rund vier Seiten. Niemand weiß zum Beispiel bisher, wie regelmäßig die beiden Schaukeln schwingen und ob sie gekoppelt sind oder sich unabhängig entwickeln. Auch den Zusammenhang mit anderen Klimaphänomenen wie dem asiatischen Monsun oder der Nordatlantischen Oszillation, einer Luftdruckschwankung über der Nordhemisphäre, gilt es noch genauer zu erforschen. Bei den vielen offenen Fragen sollte man allerdings daran denken, dass PDO und AMO erst seit gut zehn Jahren intensiv untersucht werden.

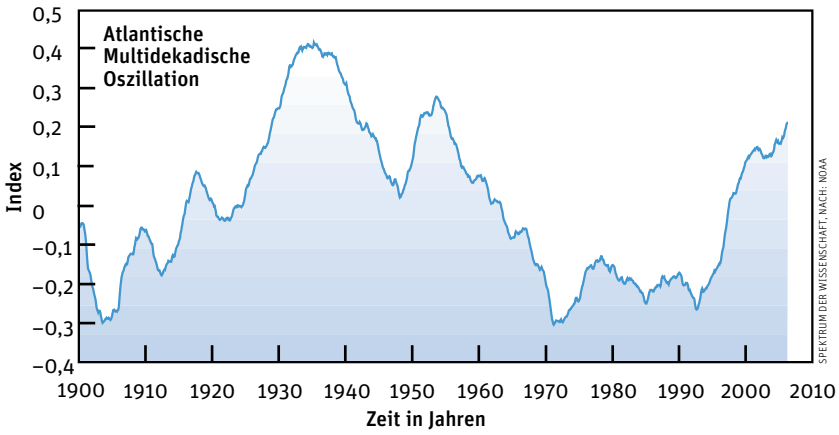


Auch im Atlantik gibt es einen langfristigen Klimazyklus. Die positive Phase dieser Atlantischen Multidekadischen Oszillation (AMO) ist hier dargestellt. Sie zeichnet sich durch ungewöhnlich hohe Temperaturen im Norden aus. In der negativen Phase ist es dort hingegen kühler als im Durchschnitt.

Die Launen der Meeresströmungen

In einem sind sich die Forscher sicher: Die Ozeane haben einen beträchtlichen Anteil an der Entstehung der natürlichen Klimaschwankungen. Von der AMO nehme man heute an, dass sie mit Oszillationen der Umwälzzirkulation im Atlantik zu tun hat, sagt der Ozeanphysiker Henk Dijkstra vom Institut für Meeres- und Atmosphärenforschung der Universität Utrecht. Bei dieser Zirkulation, die durch Dichteunterschiede und Winde angetrieben wird, strömt warmes, salzreiches Wasser in oberen Meeresschichten nach Norden. Dort kühlt es ab, sinkt in die Tiefe und

Der Index der Atlantischen Multidekadischen Oszillation schwankt mit einer Periodendauer von 50 bis 80 Jahren (Glättung: Fünfjahresmittel). Derzeit haben wir eine positive AMO-Phase.



fließt am Meeresboden nach Süden zurück. Die AMO hängt mit Fluktuationen in diesem Kreislauf zusammen: Strömt besonders viel Wasser gen Norden, dann erwärmt sich der Nordatlantik; schwächt sich die Strömung dagegen ab, sinkt dort die Meerestemperatur.

Alle weiteren Details sind umstritten. Einige Forscher favorisieren als Ursache der AMO die oben erwähnte Nordatlantische Oszillation; denn die atmosphärische Druckschwankung hat über die Bewölkung und Winde auch großen Einfluss auf die Wassertemperatur. Andere sprechen dem Meereis und den Strömungen im Arktischen Ozean die entscheidende Rolle zu. Manche Experten wiederum halten die Vorgänge in den Tropen für bedeutsamer. Schließlich vermutet eine weitere Gruppe – darunter auch Dijkstra –, dass interne ozeanische Oszillationen das Wesen der AMO ausmachen.

Bei der PDO sind die Verhältnisse noch komplizierter. Sie gilt als relativ unscharfes Phänomen, das sich laut Dijkstra nicht so deutlich vom Grundrauschen der Wetter- und Klimaschwankungen abhebt wie die AMO. Das erschwert die Ursachenforschung beträchtlich. Manche Forscher betrachten die PDO zum Beispiel nicht als eigenständige Schwingung. Sie halten sie bloß für eine langfristige Modulation von El Niño. Allerdings ist diese Erwärmung des Pazifiks, die alle zwei bis sieben Jahre auftritt, auf die Tropen beschränkt, wogegen die PDO den gesamten Stillen Ozean umfasst.

Wie Wissenschaftler um Bill Patzert vom Jet Propulsion Laboratory der NASA im April dieses Jahres berichteten, stehen wir derzeit am Beginn einer negativen PDO-Phase. In diesem Fall würde in den nächsten Jahren statt El Niño häufiger seine »kalte« Schwester herrschen: La Niña.

Das könnte weit reichende Folgen haben – sofern PDO und AMO merklich auf die globale Durchschnittstemperatur einwirken. Dafür sprechen nicht nur die Computersimulationen von Keenlyside und anderen Forschern, sondern auch die Temperaturkurven im 20. Jahrhundert. Während einer positiven PDO-Phase wie den 1930er Jahren stieg die globale Durchschnittstemperatur in der Regel. Zwischen 1947 und 1976 dagegen, als der PDO-Index meist negativ war, stagnierte die Erwärmung der Erdatmosphäre. Von 1977 bis 1998 kletterten die Temperaturen dann wieder rasant. Möglicher Grund: Eine positive PDO-Phase fiel mit einem Anstieg des AMO-Index zusammen.

Der Mechanismus, über den die beiden Oszillationen die globale Mitteltemperatur beeinflussen könnten, ist freilich unklar. Man weiß nur, dass El-Niño-Ereignisse, die in positiven PDO-Phasen verstärkt werden, die globale Temperatur um ein paar Zehntelgrad anheben. Analog könnte sich die Wärme des Nordatlantiks in positiven AMO-Phasen auf die Atmosphäre übertragen und so für erhöhte Temperaturen auf der Nordhalbkugel sorgen. Doch von einer fundierten Theorie sind diese Überlegungen noch weit entfernt.

Klimatologen interpretieren den Temperaturverlauf in den vergangenen Jahrzehnten meist anders. Für die Stagnation von 1947 bis 1976 machen sie den kühlenden Einfluss von Aerosolteilchen verantwortlich, die mit der zunehmenden Industrialisierung in die Atmosphäre gelangten. Durch Umweltschutzmaßnahmen wurde die Luft dann wieder sauberer, während die Emission von Kohlendioxid und Methan kräftig stieg. Beides verstärkte den Treibhauseffekt und könnte so die nachfolgende schnelle Erwärmung verursacht haben.

Klimaprognosen für die nächsten zehn Jahre

Es bleiben also viele Fragezeichen. Doch unabhängig davon dürfte, was bisher über die beiden ozeanischen Klimaschwankungen herausgefunden wurde, jetzt schon von großem praktischem Wert sein. Wenn auf der Zeitskala von Jahrzehnten klare Oszillationen auftreten, ließe sich das für kurzfristige Prognosen der Klimaentwicklung nutzen.

Schon heute versuchen sich die Meteorologen mit wachsendem Erfolg an der saisonalen Witterungsvorhersage (Spektrum der Wissenschaft 8/2005, S. 48). Dabei stützen sie sich auf die Trägheit des Klimasystems – sein »Gedächtnis« sozusagen. Vor allem der Ozean »er-

DIE KLIMAWETTE

Anfang Mai prognostizierten Kieler und Hamburger Forscher einen **vorübergehenden Stopp** der Erderwärmung in den kommenden zehn Jahren. Damit erregten sie nicht nur großes Aufsehen in der Öffentlichkeit, sondern auch teils heftigen Widerspruch bei Fachkollegen. Der bekannte Klimaforscher Stefan Rahmstorf vom Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK) ging sogar so weit, gemeinsam mit Gleichgesinnten in seinem Blog bei Spektrum der Wissenschaft (www.wissenslogs.de) eine **Wette über 5000 Euro** anzubieten, dass sich die Vorhersage nicht bewahrheiten wird. Die Gegenseite hat bisher nicht reagiert, woraus Rahmstorf polemisch schließt, dass sie anscheinend selbst nicht an ihre Vorhersage glaubt. Auf den Ausgang der Wette darf man jedenfalls gespannt sein, auch wenn er erst in einigen Jahren feststeht.

Die Redaktion

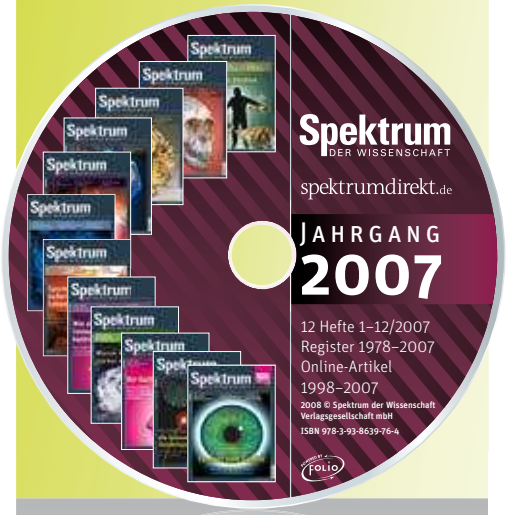
HOLLY HISTORICAL SOCIETY, COLORADO

Durch eine ungewöhnliche Trockenheit im Mittelwesten der USA Mitte der 1930er Jahre kam es zu schweren Staubstürmen, die über das ganze Land fegten. Das Bild entstand in Texas im April 1935. Die extreme Dürre hing vermutlich mit den Klimaoszillationen im Pazifik und Atlantik zusammen.

NASA, JESSE ALLEN / NSIDC, TERRY M. HARAN UND MATTHEW H. SAVOIE

In den letzten Jahren ist im Sommer die arktische Eisdecke ungewöhnlich stark zurückgegangen und hat 2007 ein Rekordminimum erreicht. Als Hauptursache gilt die globale Erwärmung, doch könnte die derzeitige positive AMO-Phase die Entwicklung beschleunigen.

Ein starker Jahrgang ...



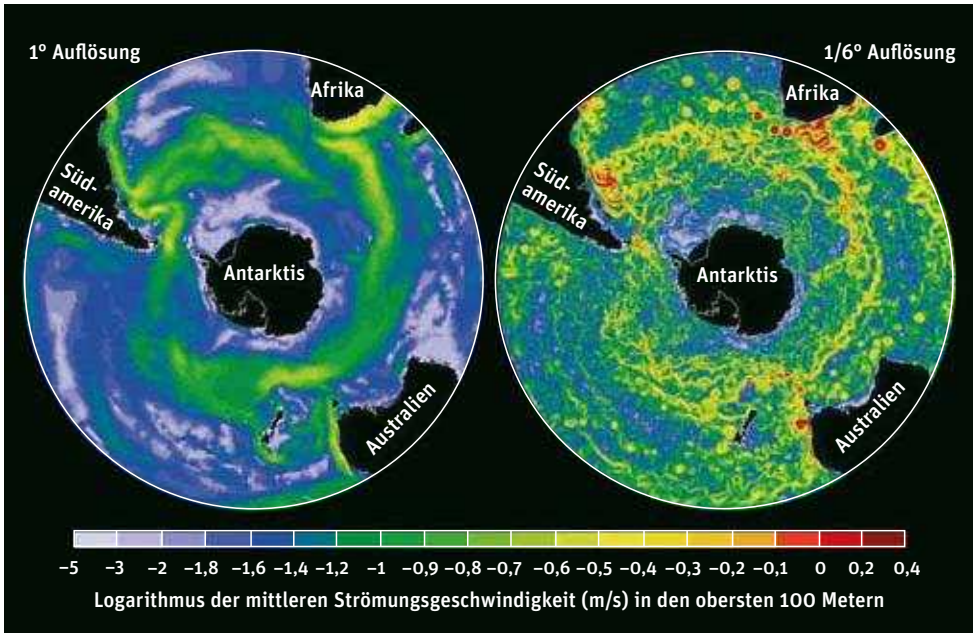
... ist die CD-ROM 2007 von **Spektrum der Wissenschaft.** Sie bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert). Des Weiteren finden Sie das **spektrumdirekt**-Archiv mit ca. 10 000 Artikeln. **spektrumdirekt** und das Suchregister laufen nur unter Windows. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,– (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland); Bestellen können Sie über den Beihefter oder unter:

www.spektrum.de/lesershop

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg | Tel 06221 9126-743 | Fax 06221 9126-751 | service@spektrum.com

Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissen aus erster Hand

Als Ursache der Oszillationen in Pazifik und Atlantik vermuten Klimaforscher Meeresströmungen. Besondere Bedeutung könnten dabei kleinräumige Turbulenzen haben. Deren Berechnung ist schwierig, hat aber jüngst große Fortschritte gemacht. Das belegen die beiden gezeigten Simulationen. Die ältere (links) hat eine Auflösung von nur etwa 110 Kilometern und entspricht den Modellierungen, die den Projektionen im Bericht des UN-Klimarats (IPCC) von 2007 zu Grunde lagen. In einer neueren Simulation ließ sich die Ausdehnung der kleinsten erfassbaren Details auf knapp zwanzig Kilometer senken (rechts).



NOAA, GFDL

innert« sich an die Vergangenheit, und in geringerem Maße gilt das Gleiche für das Meereis und die Bodenfeuchte.

Ließe sich die Tendenz von PDO und AMO einige Jahre im Voraus bestimmen, wäre das viele Millionen Euro wert. Tatsächlich weisen Computersimulationen von Latif und anderen darauf hin, dass eine mehrjährige Vorhersage des regionalen Klimas in Reichweite ist. Der Nutzen für die Gesellschaft wäre beträchtlich. Man stelle sich etwa vor, Klimaforscher könnten die Wiederkehr von Verhältnissen wie bei der »Dust Bowl« im Mittleren Westen der USA prognostizieren – einer Dürreperiode in den 1930er Jahren, die vermutlich eng mit den beiden Klimaoszillationen zusammenhing. Die Politik hätte dann die Möglichkeit, rechtzeitig Vorkehrungen zu treffen. Ähnliches gilt für Trockenperioden in der Sahelzone oder das asiatische Monsunsystem: Eine Vorwarnung würde den betroffenen Regionen helfen, sich beizeiten auf einen Wandel einzustellen.

Mit kurzfristigen Klimaänderungen, die sich gravierend auf ganze Volkswirtschaften auswirken, ist immer zu rechnen – unabhängig davon, welche Konsequenzen der verstärkte Treibhauseffekt durch Kohlendioxid und Methan im Detail hat. Die meisten heutigen Klimamodelle erstellen langfristige Prognosen. Das ist sinnvoll, weil es darum geht, Gefahren in ferner Zukunft aufzuzeigen, denen wir heute schon begegnen müssen. Daneben aber wären für viele politische Entscheidungen auch kurzfristige Prognosen für die nächsten fünf, zehn und zwanzig Jahre, die zuverlässige regionale Aussagen erlauben, von großem Wert. Noch gibt es sie nicht – eben weil die dekadischen und multidekadischen Klimaschwankungen wegen des unklaren Mechanismus bisher undurchschaubar sind. Doch vielleicht wird sich das ändern: Unter den Fachleuten wächst der Ehrgeiz, das Problem anzupacken und zu lösen.

Die Voraussetzungen dafür verbessern sich zusehends. So arbeiten Wissenschaftler im Rahmen des internationalen Global Climate Observing System (GCOS) derzeit mit vereinten Kräften an der Erhebung zusätzlicher Klimadaten. Neben neuen Satelliten steht dabei der Ausbau des weltweiten Beobachtungssystems im ozeanischen Bereich im Vordergrund. Zum Beispiel wurde Ende 2007 das Argo-Netzwerk komplettiert, dessen 3000 Bojen nun weltweit Messdaten aus Wasserschichten bis in 2000 Meter Tiefe liefern.

Zuversichtlich stimmt auch der Fortschritt bei den Computermodellen, den immer schnellere Rechner und raffiniertere mathematische Verfahren ermöglichen. Dabei kommt es darauf an, die Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Ozeanen genauer zu repräsentieren. Entscheidend dürfte auch sein, dass die Modelle kleinere Wasserwirbel darstellen können als heute. Vor allem wegen solcher kleinräumigen Turbulenzen ist nach Ansicht einiger Meeresforscher – darunter der renommierte Experte Carl Wunsch vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge (USA) – der Ozean noch schwieriger zu modellieren als die Atmosphäre.

Vielleicht lässt sich der Status quo der kurzfristigen Klimaprognosen mit den Wettervorhersagen in den 1960er Jahren vergleichen. Ob die Verbesserung aber genauso schnell ablaufen wird, bleibt abzuwarten. ◁

Sven Titz ist promovierter Meteorologe und arbeitet als freier Journalist in Berlin.

Kerr, R.: Atlantic Climate Pacemaker for Millennia Past, Decades Hence? In: Science 309, S. 41–43, 1. Juli 2005.

Mantua, N. J. et al.: A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. In: Bulletin of the American Meteorological Society 78, S. 1069–1079, Juni 1997.

Smith, D. et al.: Improved Surface Temperature Prediction for the Coming Decade from a Global Climate Model. In: Science 317, S. 796–799, 10. August 2007.

Wunsch, C.: Ocean Observations and the Climate Forecast Problem. In: Meteorology at the Millennium, Academic Press, S. 233–248, 2001.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/960476.

Science & Fun im Science-Shop

ARX-03 ASURO Roboter-Bausatz

Bausatz für einen autonomen multisensoriellen Roboter

Licence DLR, LxHxB: ca. 117x122x45mm, Gewicht: ca. 165g (incl. Akkus oder Batterien), mit ausführlicher Anleitung. Stromversorgung: 4 x AAA/Micro-Batterien oder Akkus (nicht enthalten), AREXX.

Bestell-Nr. 1891. € 49,95 (D), € 51,40 (A)

ASURO ist ein am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickelter Bausatz (Löten erforderlich) für einen autonomen multisensoriellen Roboter. Neben sechs Kollisionstastern und einer optischen Einheit zur Verfolgung einer Linie verfügt ASURO über zwei Odometer und einige Anzeigeelemente. Die mitgelieferte Duplex-Infrarotschnittstelle erlaubt die drahtlose Programmierung, wie auch eine Fernsteuerung mit dem PC. Das »Gehirn« des Roboters ist ein RISC-Prozessor, der auch die Abarbeitung komplexer Programme ermöglicht. Die Programmierung erfolgt in C, wobei auf vordefinierte Funktionen zur Ansteuerung der beiden Motoren, der Sensoren und Anzeigen zurück gegriffen werden kann.

SW007 Sky Walker – Roboterbausatz

Bausatz für einen Roboter mit 2 Sensoren, vorgelötet

Maße (LxHxB): ca. 9x14x9 cm, AREXX.

Bestell-Nr. 2613.
€ 19,95 (D), € 19,95 (A)

Der Sky Walker ist ein witziger, kleiner Roboter mit zwei Sensoren. Ein Sensor reagiert auf Veränderungen in der Lichtintensität, der andere auf Geräusche. Die ausführliche Anleitung erklärt Schritt für Schritt und mit vielen Bildern den Aufbau des Roboters. Es macht viel Spaß, den Sky Walker zu bauen und die Teile zu einem »lebenden Geschöpf« zusammen zu setzen. Ab 14 Jahren und auch für Erwachsene.

Die Mathematik-Uhr Edition 2008

»Es ist jetzt genau e nach Pi«

Original WMC©-geprüftes Miyota-Quarz-Markenuhrwerk, mit Kalbsledererarmband, Moredata.

Bestell-Nr. 2635. € 79,90 (D), € 79,90 (A)

Die moderne Edition 2008 unserer Mathematikuhr geht ›Ton in Ton‹ mit dem diesjährigen Jahr der Mathematik, das sich ganz in Orange präsentiert. Ein hochwertiges Accessoire für Zahlenliebhaber, die Farbe mögen.

Bestellen Sie bequem telefonisch: 06221 9126-841

Das Kopernikus-Planetarium

Kartonbausatz im Nostalgie-Look

2008, Bausatz mit Zubehör, Höhe 29,5 cm, Ø 29 cm, Sunwatch.

Bestell-Nr. 2586.
€ 31,90 (D), € 31,90 (A)

Basteln Sie ein voll funktionsfähiges Kurbelplanetarium im Stile eines Orrery, wie sie im 18. Jahrhundert Mode waren. Nach 20 bis 30 Stunden Bauzeit lassen sich damit viele himmlische Vorgänge vom kopernikanischen (heliozentrischen) Standpunkt aus erklären, z. B. das Wandern der Sonne durch den Tierkreis oder die Konjunktionen von Merkur und Venus untereinander und mit der Sonne. Diese ist mit einer hellen LED ausgestattet und zeigt im abgedunkelten Raum nicht nur den Wechsel der Jahreszeiten, sondern auch das Entstehen der Mondphasen, der Finsternisse und die Sichelphasen der Venus.

Portofreie Lieferung in D&A ab einem Bestellwert von € 20,–*

Der Stirling-Motor Kartonbausatz

Kartonbausatz für einen voll funktionstüchtigen Stirling-Motor

2006, SunWatch.

Best-Nr. 2321.
€ 21,90 (D), € 21,90 (A)

Setzen Sie diesen voll funktionstüchtigen Stirling-Motor auf eine Tasse mit kochend heißem Kaffee (oder auf eine Kaltkompresse), geben Sie dem Schwungrad einen kleinen Schubs nach links, und der genügsame Apparat beginnt leise zu stampfen – bis zu einer Stunde lang! Bausatz aus stabilem, gestanztem Karton in liebevoll gestaltetem Golddruck, komplett mit allem Zubehör, darunter lasergeschnittene Aluminium-Bleche, reibungsarme Kunststoff-Achslager und Drahtbiegeteile aus Federstahl. Höhe 16,5 cm, Breite und Tiefe je 12,6 cm.

Top Secret – Mini-Kreisel

»fast ewig laufender« Magnetkreisel

Durchmesser Untersatz: 9 cm, Höhe 3,2 cm, der Minikreisel ist 2,6 cm hoch, 9 V Batterie enthalten, Kinzel.

Bestell-Nr. 2581. € 14,95 (D), € 14,95 (A)

Top Secret ist einfach zu bedienen und hat einen tollen Effekt! Lassen Sie den Kreisel auf der Plattform kreiseln. Zu Ihrer Verwunderung wird dieser Stunden, wenn nicht auch tagelang weiter kreiseln! Funktioniert nur mit Batterie (beiliegend). Fast ein Perpetuum Mobile, aber leider auch nur fast.

Mehr Freude am Lesen:

libri_x Leselicht

NEU

Kompaktes LED-Leselicht

Leuchtenarm und Leuchte individuell verstellbar, mit praktischer Aufbewahrungsbox, zwei Batterien (2 x 3V, AA) sind enthalten. Moses.

Bestell-Nr. 2640.
€ 18,95 (D), € 18,95 (A)

Endlich ist ungestörtes Lesen in ihrer Lieblingsecke oder an lauen Sommerabenden auf dem Balkon möglich! Mit schönem Etui, handelsüblichen Batterien und LED-Leuchte.

Buchstütze easy-read®

Die bequeme Art des Lesens oder Arbeitens am PC

Bestell-Nr. 2187. € 19,95 (D), € 19,95 (A)

Die bequeme Art des Lesens: Ob am PC, am Schreibtisch oder im Bett, diese schlaue Erfindung behält Ihre Lektüre fest im Griff.

Pen Ultimate

Bestell-Nr. 1667.
€ 13,90 (D), € 14,20 (A)

Der schwebende Pen Ultimate ist ein Blickfang auf Ihrem Schreibtisch. Der Kugelschreiber schwebt in einer speziellen Halterung und kann um die Längsachse in Rotation gebracht werden.

MOVA®GLOBE

Permanent geräuschlos rotierender Globus

Durchmesser des Globus: 120 mm, Physisches Kartenbild in englischer Sprache, PEROS.

Bestell-Nr. 2582.
€ 199,– (D), € 199,– (A)

Dieser völlig neuartige Hi-Tech Globus der Spitzenklasse rotiert permanent und geräuschlos. Alles was er braucht, ist normales Raumlicht. Keine Batterie, keine Stromversorgung, kein Schütteln, kein Aufziehen! Der Magnetantrieb des Globus bezieht seine Energie aus dem Erdmagnetfeld und dem Licht, das auf Solarzellen im Innern des Globus fällt.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de

*Bestellungen in D & A unter € 20,– sowie Bestellungen im sonst. Ausland berechnen wir mit € 3,50. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsges. mbH

SERIE: ARCHÄOLOGIE IN WESTAFRIKA
Teil I: Das Rätsel der Nok-Kultur SdW 7/2008
Teil II: Begann das Neolithikum in Afrika? SdW 8/2008
Teil III: Die Savanne – eine Kulturlandschaft SdW 9/2008

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Wann begann Afrikas Jungsteinzeit?

Fast 12 000 Jahre alte Keramik aus Mali stellt das Lehrbuchwissen über die »neolithische Revolution« in Frage.

Von Eric Huysecom

Seit der *Homo sapiens*, der anatomisch moderne Mensch, vor mehr als 100 000 Jahren seine ersten Schritte in Afrika unternahm, lebte er wie seine Vorfahren – von Aas, von der Jagd sowie vom Sammeln essbarer Pflanzen. In der Jungsteinzeit aber erfand er eine völlig neue Form, sich und seine Angehörigen zu ernähren: die Landwirtschaft. Er begann, Tiere zu domestizieren und Pflanzen anzubauen, gründete Dörfer und gab sein Nomadentum auf. Um Lebensmittel aufzubewahren und Korn zu kochen, lernte der Mensch, Gefäße aus Ton zu formen und diese zu brennen. All das geschah, so die Lehrmeinung, vor gut 10 000 Jahren, weit entfernt von seiner afrikanischen Heimat im Vorderen Orient, im Gebiet des so genannten Fruchtbaren Halbmonds, einer sichelförmigen Region in Nordmesopotamien und Palästina. Von dort aus breitete sich die »neolithische Revolution« allmählich aus. Über die Küsten und Inseln des Mittelmeerraums wie auch über den Balkan gelangte die neue Wirtschaftsweise als Gesamtpaket aus Sesshaftigkeit, Landwirtschaft und Keramikfertigung schließlich im 4. Jahrtausend v. Chr. auch nach Mitteleuropa.

Dass die Wirklichkeit komplexer war, wissen Forscher spätestens seit der Entdeckung der monumentalen Tempelanlage von Göbekli Tepe sowie zeitgenössischer Dörfer im Südosten der heutigen Türkei: Sie belegen, dass der bäuerlichen Lebensweise gut 10 000 Jahre v. Chr. eine Übergangsphase vorausging, in der reiche Vorkommen an Wildgetreide bereits ein gutes Leben sicherten. Sie zu sammeln und vor gefräßigen Herdentieren zu schützen, ging mit der Gründung von Dörfern einher.

Doch als Jungsteinzeit gilt diese Kulturphase im Bergland Nordmesopotamiens noch nicht, da sie nur Sesshaftigkeit vorzuweisen hat, nicht aber Ackerbau, Viehzucht oder Töpferei. Eine Komponente mehr kannten die Menschen der Tiefebene des Fruchtbaren Halbmonds im so genannten Präkeramischen Neolithikum A (um 9000–8500 v. Chr.): Sie entwickelten bereits den Getreideanbau. Viehzucht und erste Keramik kamen in Phase B (8500–etwa 6000 v. Chr.) hinzu. Etwa 6000 v. Chr. folgte das »Keramische Neolithikum«, in dem alle Komponenten voll entwickelt waren. In dieser Form verbreitete sich die Jungsteinzeit durch Migration und Technologietransfer bis nach Europa.

Überraschendes Alter

Seit den 1990er Jahren erkunden wir den Fundplatz Ounjougou, in Mali (siehe Karte S. 64 und Kasten S. 66). Zu unserer Überraschung entdeckten wir während der Kampagne 2003 Bruchstücke gebrannter Keramik in einer Erdschicht, die über den Schichten der Altsteinzeit lag, aber älter als 10 000 Jahre war. Weitere Grabungen zwischen 2004 und 2006 lieferten uns neue Daten, demnach waren die

In Kürze

Ob eine steinzeitliche Kultur bereits als neolithisch anzusehen ist, hängt letztlich von den Kriterien der Archäologen ab. Während einige Experten schon das Aufkommen gebrannter Keramik als ausreichendes Indiz ansehen, verlangen andere den **Nachweis der Sesshaftigkeit** sowie von Ackerbau und Viehzucht. Der Fund der weltweit ältesten Keramik in Mali unterstreicht die Forderung des Autors, Afrika einen Sonderweg zuzugestehen.

Scherben sogar mehr als 11 500 Jahre alt, 2000 Jahre älter als die erste vergleichbare Keramik im Nahen Osten (6900 v. Chr.). Afrika ist also immer wieder für eine Überraschung gut.

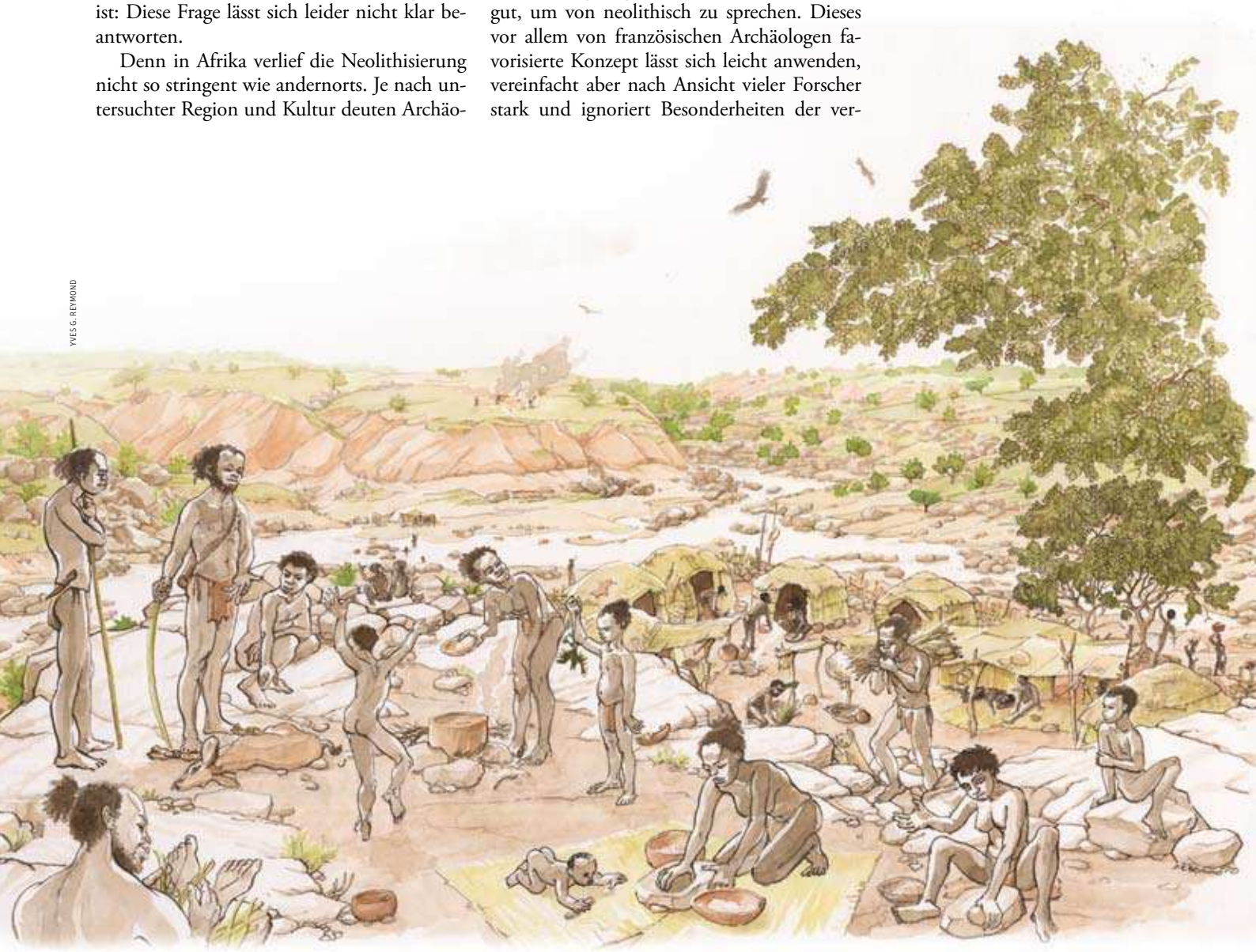
Der deutsche Philosoph Georg Wilhelm Friedrich Hegel (1770 – 1831) bezeichnete den Schwarzen Kontinent im 19. Jahrhundert noch als geschichtslos. Heute wissen wir, dass unsere Urmutter in Afrika lebte und dass dort der *Homo sapiens* entstand, auch wichtige Innovationen wie die Eisenmetallurgie und die Rinderzucht kamen vermutlich zuerst in Afrika auf (siehe Spektrum der Wissenschaft 7/2008, S. 64). Bedeuten diese neuen Funde, dass auch die Jungsteinzeit dort ihren Anfang nahm? So faszinierend die Vorstellung auch ist: Diese Frage lässt sich leider nicht klar beantworten.

Denn in Afrika verlief die Neolithisierung nicht so stringent wie andernorts. Je nach untersuchter Region und Kultur deuten Archäologen ihre Funde unterschiedlich. Es ist sogar möglich, dass ein Fundplatz von einem als neolithisch, vom anderen als protoneolithisch, von einem dritten gar als noch zur Altsteinzeit gehörig eingestuft wird. Dieser bedauerliche Mangel an Kohärenz erschwert es, den Übergang von der Alt- zur Jungsteinzeit auf dem Schwarzen Kontinent zu verstehen.

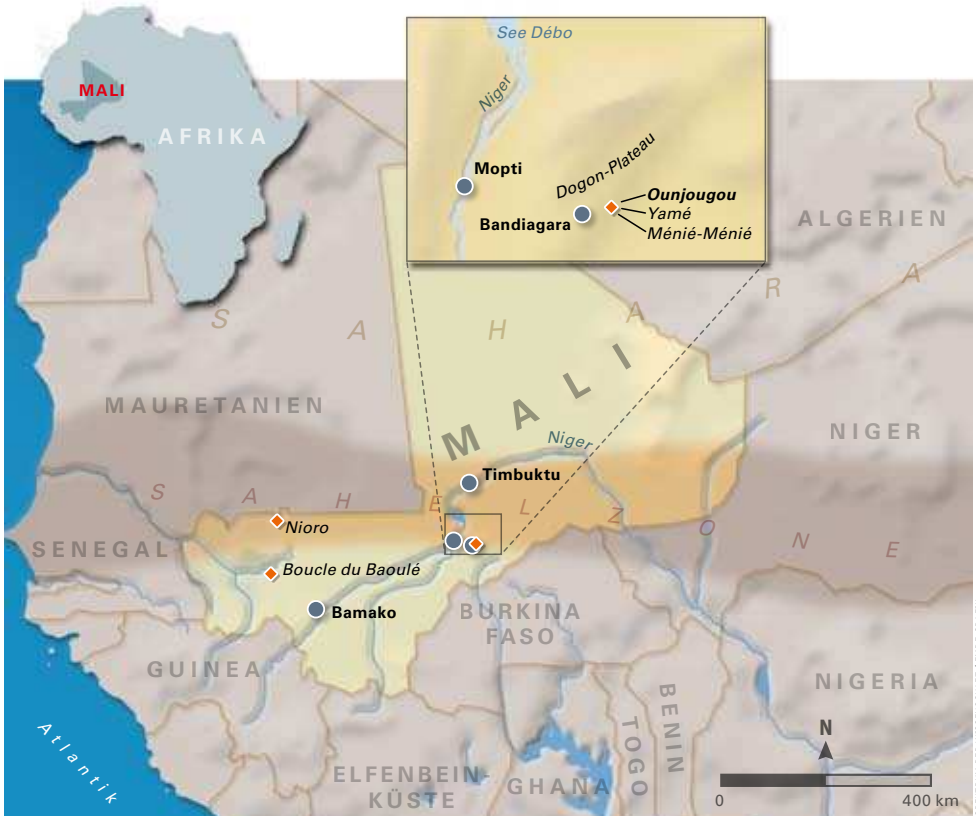
Disput unter Gelehrten

Im Wesentlichen lassen sich die Meinungen zwei Lagern zuordnen: Das eine legt den Schwerpunkt auf die materiellen Hinterlassenschaften der Menschen, das andere betrachtet ihre gesamten wirtschaftlichen Aktivitäten. Den ersten genügt deshalb Keramik im Fundgut, um von neolithisch zu sprechen. Dieses vor allem von französischen Archäologen favorisierte Konzept lässt sich leicht anwenden, vereinfacht aber nach Ansicht vieler Forscher stark und ignoriert Besonderheiten der ver-

Lagerleben auf dem Dogon-Plateau, 10 000 v. Chr. Während die Frauen Körner von Wildgetreide mahlen und Essen in einem Tontopf zubereiten, bringen einige Männer Jagdbeute heim. Andere legen fern des Lagers Feuer, damit die Gräser dort umso mehr austreiben. Die Hütten bestehen aus Ästen und Grasmatten.



YVES G. REYMOND



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ENDE GRAFIK

Gut 50 Fundstellen umfasst der Komplex Ounjougou auf dem Bandiagara-Plateau in Mali (die gesamte Region zählt seit 1989 zum Weltkultur- und Naturerbe der UNESCO).

MALI

Der westafrikanische Staat ist seit 1960 unabhängig, vorher war er französische Kolonie. Der Name knüpft an den eines mittelalterlichen Großreichs an. Malis Norden wird von wüstenhaften Gebieten wie der Sahara und der Sahelzone beherrscht, während der Süden **ausreichend Niederschläge erhält**, so dass Landwirtschaft betrieben werden kann. Dort gedeiht etwa die Sorghumhirse, im Binnendelta des Niger wird auch Reis angebaut. Mali gehört zu den ärmsten Ländern der Welt.

DIE DOGON

Die Volksgruppe der Dogon lebt an den Felsklippen des Bandiagara-Plateaus. Bekannt wurde sie zum einen durch kunstvolle Schnitzereien, insbesondere oft mehrere Meter hohe rituelle Masken, zum anderen durch das »Sirius-Rätsel«. Der französische Ethnologe Marcel Griaule berichtete in den 1930er Jahren, die **Dogon würden den Stern Sirius B kennen**, der sich aber ohne Teleskop nicht beobachten lässt. Dieser Befund diente oft als Beleg dafür, dass Außerirdische einst die Erde besucht hätten. Tatsächlich beruhte er aber auf einer fehlerhaften Befragung Griaules.

schiedenen Gesellschaften. Die zweite Gruppe von Experten verlangt den Nachweis einer produzierenden statt einer aneignenden Wirtschaftsweise, schließt sich damit der Definition der Jungsteinzeit im Nahen Osten und Europa an und berücksichtigt ökonomische Merkmale verschiedener steinzeitlicher Gruppen.

Doch seit Ende der 1970er Jahre wissen wir, dass in der Sahara und im Niltal bereits 9000 bis 8000 v. Chr. das Wissen vorhanden war, Ton zu brennen und das Schrumpfen der Rohformen durch »Magerung«, also mineralische Zusätze zu verhindern. Jedoch: Damals waren Viehzucht und Ackerbau noch nicht entwickelt, ebenso wenig wie noch einmal 500 Jahre früher auf dem Dogon-Plateau.

Ohnehin gelänge der Nachweis solcher Wirtschaftsweise in Afrika nur selten: In tropischen, eisenhaltigen Böden sind die meisten Überreste von Nahrungsmitteln längst vergangen. Felsbilder geben zwar vereinzelt Hinweise auf Haustiere, und Steinmäuerchen in einer archäologischen Stätte dienten vielleicht der Abgrenzung von Ackerflächen. Doch die Datierung ist meist schwierig, die Interpretation selten eindeutig. Selbst Werkzeuge zum Mahlen von Getreide im Fundgut verraten nicht, ob sie zur Verarbeitung angebauten Korns oder zum Mahlen von Wildgräsern verwendet wurden. Mit anderen Worten: Der zweite Ansatz würde Afrika ungerechtfertigt weit gehend aus dem Neolithikum ausschließen und die neuen Funde in Ounjougou ignorieren. Ich plädiere deshalb für eine dritte Sichtweise, die Afrika einen Sonderweg zugesteht. Insbesondere die Rolle der Keramik sollte meines Erachtens neu bewertet werden. Was anders bezeugt denn die kreative Gestaltung von Ton und das anschließende Brennen als eine Veränderung der natürlichen Elemente, vergleichbar der Domestikation von Tieren oder der Züchtung von Nutzpflanzen?

Komplementäre Formen des Wirtschaftens

Kann einer Gesellschaft, die Keramik herstellte, noch eine rein aneignende Wirtschaftsweise zugeschrieben werden? Lässt sich das nötige technologische Wissen überhaupt ohne Spezialisierung und Arbeitsteilung innerhalb einer Gruppe denken, also ohne die gesellschaftliche Differenzierung, die sich typischerweise im Lauf der Jungsteinzeit ergab? Müssen wir solche Gruppen deshalb nicht auch ohne Nachweis von Landwirtschaft und Sesshaftigkeit als neolithisch oder zumindest protoneolithisch ansprechen? Zudem hätten Jäger und Sammler von Keramik kaum Nutzen gehabt: Tongefäße sind viel zu zerbrechlich und zu schwer. Scherben geben deshalb einen Hinweis auf eine zumindest halb nomadische, also saisonal sesshafte Lebensweise, wie sie beispielsweise die Bambara in Mali heute noch praktizieren (siehe Kasten rechts).

Ethnologen wissen, dass Afrika zumindest in den letzten drei Jahrtausenden komplemen-

Jäger oder Bauern? – Malis Völker heute

Drei Bevölkerungsgruppen im heutigen Mali – die Somono des Nigerbinnendeltas, die Fulbe-Hirten und die Ackerbauern der Bambara im Westen von Mali – veranschaulichen, wie komplex der Nahrungserwerb organisiert sein kann – und wie schwer dergleichen für einen Archäologen zu erkennen wäre.

Die Baumsavannen des Nationalparks »Boucle du Baoulé«, an einem Nigerzufluss im Westen von Mali (Region Kayes) gelegen, sind während der Trockenzeit das Ziel junger Fulbe-Hirten und ihrer Herden. Sie leben dort in Asthütten, die sie mit Matten oder Häuten bedecken. Die Männer stammen aus der Stadt Nioro im Sahel, wo ihre Familien verschiedene Arten des Handwerks ausüben und, während der Regenzeit, Hirse anbauen. Die Herde steigert bei den Fulbe vor allem das Ansehen ihres Besitzers. So nutzen die Hirten nur die Milch, töten aber keine Rinder. Keramik führen sie nicht mit, sie wäre zu schwer, stattdessen benutzten sie Kalebassen als Gefäße.

Die Somono leben im Binnendelta des Niger, einem sehr flachen Gebiet, das jedes Jahr von Hochwassern überschwemmt wird – gute Bedingungen für den Reisanbau, den sie von Mai bis November betreiben. In dieser Zeit leben sie in Dörfern und betreiben auch verschiedene Arten von Handwerk, darunter die Töpferei. Nach der Ernte, gegen Dezember, ziehen die kräftigen Dorfbewohner an den See Débo im südlichen Delta, wo sie für einige Monate in Strohhütten leben und dem Fischfang nachgehen. Mit großen Reusen und Netzen riegeln sie dabei mehrere hundert Meter ab, eine Arbeit, die Kraft und Kooperation erfordert. Die gefangenen Fische werden getrocknet und geräuchert. Die dazu notwendigen Tongefäße bringen die Männer aus ihren Dörfern auf großen Pirogen mit.

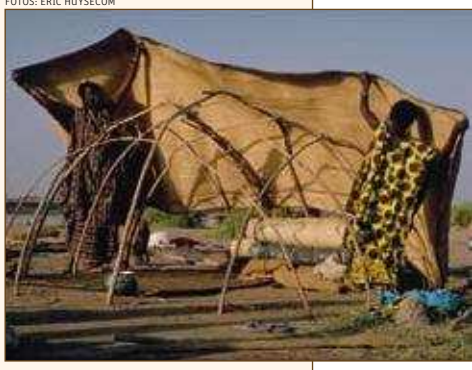
Ein drittes Volk Malis, die Bambara, leben dauerhaft in Dörfern. Während der Regenzeit bauen sie Hirse, Bohnen, Erdnüsse und etwas Reis an. In der Trockenzeit töpfern die Frauen und flechten Körbe, sammeln Gräser und Wildfrüchte. Die Männer gehen unterdessen zum Fischfang und unternehmen Treibjagden im Busch; das erlegte Wild wird noch vor Ort zerlegt, das Fleisch geräuchert. Im Dorf besitzen die Bambara von Baoulé auch einige Kühe und Ziegen, aber vor allem wegen ihrer Milch.

Alle drei Gesellschaften wirtschaften also produzierend und aneignend. Stellen wir uns einen Archäologen vor, der in 2000 Jahren auf ihre Spuren stößt. Die Hinterlassenschaften einer saisonalen Lagerstätte der Fulbe würden ihm den Eindruck eines Lagers von Jägern und Sammlern vermitteln: Knochen, jedoch nicht von Vieh, Reste von Feuerstellen und Waffen, aber keine Keramik. Gräbt er hingegen im Fulbe-Viertel in Nioro, sähe er sich auf den Spuren von Bauern und Töpfern. Dass es sich bei beiden Fundplätzen um die gleichen Leute handelt, würden sie sicherlich nicht vermuten.

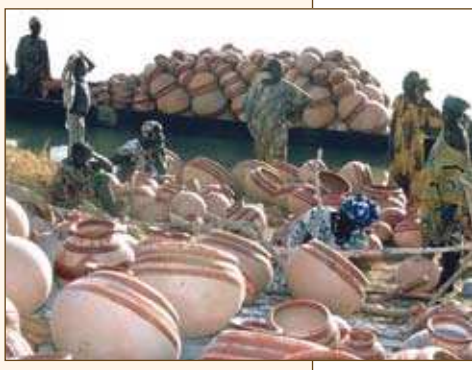
Keramik in den Somono-Dörfern am See würde der Forscher als Indiz dafür deuten, dass die Fischer ihren Fang gegen Töpferwaren ihrer Nachbarn eingetauscht hätten. Die Überreste eines Bambara-Dorfs machten den Archäologen vermutlich glücklich, hätte er doch endlich eine sesshafte Gruppe aufgespürt, die Ackerbau und Handwerk betrieb. Wie sollte er ahnen, dass die Männer dieses Volks die Hälfte ihrer Zeit jagen? Davon bleiben keine archäologisch fassbaren Spuren.

Somono, Fulbe und Bambara leben halb nomadisch. Jedes Volk hat seine eigene Strategie entwickelt, den täglichen Nahrungsbedarf zu decken. Mitunter tauschen sie: Die Fulbe-Hirten geben den Bambara Milch gegen Hirse. Es spricht nichts gegen die Annahme, dass solche komplexen Strukturen auch vor gut 12000 Jahren schon entwickelt waren.

FOTOS: ERIC HUYSECOM



Eine typische Fulbe-Hütte



Keramikmarkt der Somono

Ein Dorf der Bambara

täre, sich ergänzende Arten des Wirtschaftens entwickelt hat: Verschiedene Gruppen haben sich auf einzelne Aspekte wie Fischfang oder Ackerbau spezialisiert und tauschen die Güter untereinander aus. In ihrer Gesamtheit weist eine solche komplexe Konstellation alle Aspekte einer neolithischen Gesellschaft auf.

Doch das sind vermutlich neuere Entwicklungen. Vor 12000 Jahren lebten die Menschen auf dem Dogon-Plateau wahrscheinlich von einer planvoll betriebenen Ernte essbarer Wildpflanzen – nicht anders als zur gleichen Zeit im Umfeld des Göbekli Tepe in der heutigen Türkei. Solch eine Vorstufe zur Ackerbaugesellschaft verlangt zumindest für die Zeit der Ernte Sesshaftigkeit, wohl auch erste Eingriffe in die Natur wie das Auflichten des afrikanischen Buschs durch Feuer (mehr dazu im dritten Teil der Serie).

Voraussetzung ist allerdings, dass die begehrten Pflanzen in reichem Maß vorkommen. Das war dank eines globalen Klimawandels vor etwa 13000 Jahren tatsächlich der Fall. Eine seit Jahrtausenden andauernde Trockenheit ging dem Ende entgegen, in der Sahara füllten sich Senken mit Wasser, es ent-

E. MARTINEZ

Eine etwa 5000 Jahre alte Pfeilspitze, entdeckt an einer der archäologischen Stätten von Ounjougou, lässt sich der Machart nach Bewohnern der Sahara zuordnen – als dieses Gebiet austrocknete, wanderten die Klimaflüchtlinge gen Süden.

NATIONALMUSEUM TOKIO

ALTERSREKORDE

Die ältesten bekannten Keramikgefäße fertigte die japanische Jomon-Kultur vor 11 000 v. Chr. (Bild oben). Knapp 2000 Jahre jünger sind die Fragmente, die das Team des Autors in Ounjougou (Mali) ausgegraben hat (siehe Foto rechte Seite oben). In der Wüste Ténéré (Niger) und im Niltal brachten Archäologen Keramik ans Licht, die etwa aus der gleichen Zeit stammt. Weitere Gefäße entstanden in der Zentralsahara im heutigen Libyen und Algerien mehr als 500 Jahre später. Die älteste Keramik des Vorderen Orients fanden Archäologen im Tell Sabi Ayad in Syrien, sie wurde auf 6900 bis 6800 v. Chr. datiert.

Die Werkstätten von Ounjougou

Etwa 15 Kilometer von dem Dorf Ounjougou auf dem Bandiagara-Plateau im Dogon-Land in Mali (siehe Karte S. 64) entfernt liegt einer der interessantesten archäologischen Plätze Westafrikas. Heute gehört die Region zur Sahelzone, die sich zwischen der sudanesischen Savanne und der Sahara erstreckt, ein trockenes Gebiet, bedeckt von karger Strauchsavanne. Doch das war nicht immer so, denn globale Klimaveränderungen haben die Sahelzone von Zeit zu Zeit verschoben: Bei feuchterem Klima verlagerte sie sich nach Norden zur Sahara hin, in diesen Phasen wurde das Dogon-Plateau offenbar dicht besiedelt. Die Fundplätze, die das Team von der Université de Genève in Ounjougou gefunden hat, liegen in einem Becken rund um den Zusammenfluss von vier Wasserläufen, von denen der bedeutendste, der Yamé, in den Niger mündet. Weil der Säuregehalt des Bodens wie andernorts in Afrika auch Knochen mit der Zeit zerstört, liefern Steinartefakte und Sedimente die einzigen Hinweise zur Rekonstruktion der steinzeitlichen Umwelt.

Die Hinterlassenschaften der möglicherweise ersten Siedler in Westafrika sind mindestens 150 000 Jahre alt. Es handelt sich um »Chopper«, also Geröllsteine, die auf einer Seite zu einer Schneide gearbeitet sind, sowie um »Chopping Tools«, die beidseitig so behauen sind, dass eine scharfe Kante entsteht. Hinzu kommen Polyeder aus Sandstein, die zu den allerersten von Hominiden entwickelten Werkzeugen gehören. Über dieser Schicht würden Forscher eine des so genannten Acheuléen erwarten, das sich in der Machart der Werkzeuge deutlich unterscheidet. Es entwickelte sich in Ostafrika vor 1,7 Millionen Jahren, breitete sich über den Kontinent aus und kam vor 500 000 bis 300 000 Jahren nach Europa. Seine typischen Spalt- und Faustkeile findet man durchaus an den Rändern der Sahara, nicht aber auf dem Dogon-Plateau.

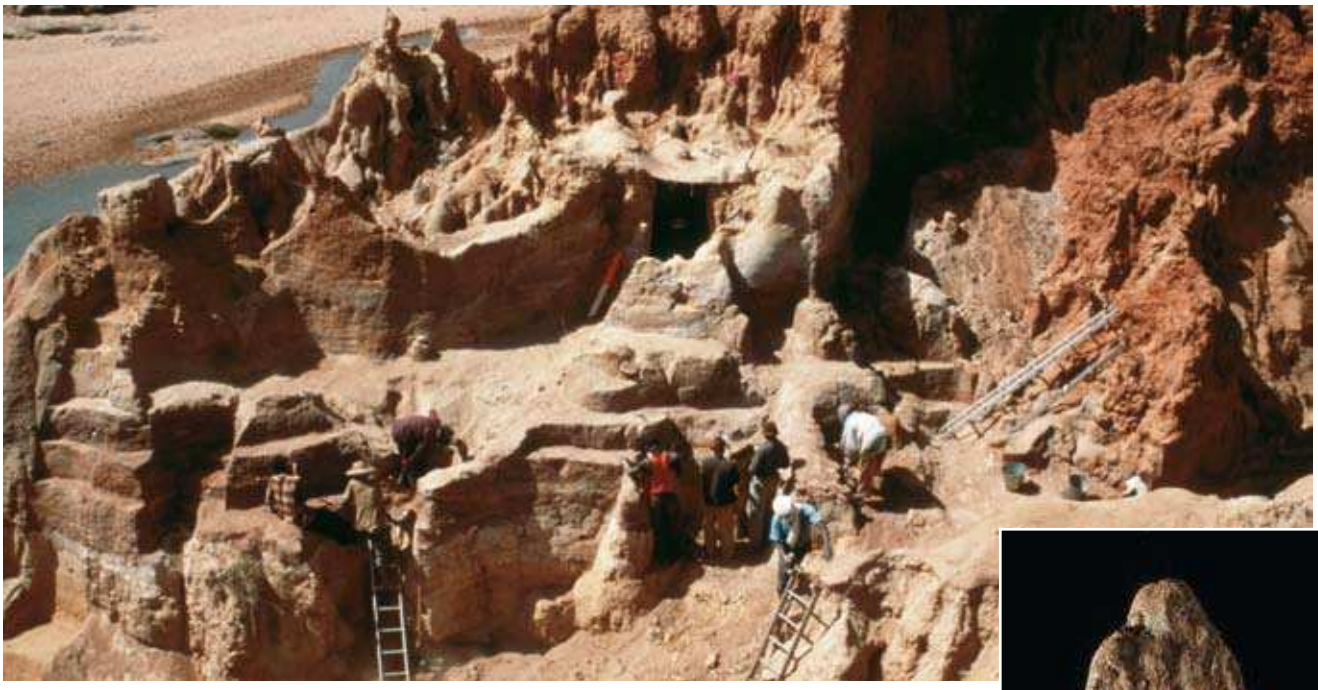
Die Archäologen stehen vor einem Rätsel. Offenbar wurde Ounjougou erst wieder im Mittelpaläolithikum von Menschen genutzt, dann aber folgte eine Besiedlungsphase auf die nächste, allein zwischen 68 000 und 23 000 v. Chr. können die Archäologen etwa 20 Phasen unterscheiden.

In Oumounaama – einem Fundplatz in der Nähe eines Bachs, der in den Yamé fließt – haben sie den Abfall einer Werkzeugfertigung entdeckt: Reste von Quarzsandstein, die der Bach verteilte, bevor er sie unter Sand und Kies begrub (die zugehörige Sedimentschicht ist etwa 65 000 Jahre alt). Man kann sich vorstellen, wie ein oder zwei Personen Sandsteinblöcke sammelten, sich auf den Boden setzten und davon Klingen abschlugen (siehe Illustration). Harte Kiesel, die sie offenbar wieder mitnahmen, dienten dabei als Hammer.

Eine regelrechter Handwerksbetrieb florierte vor 35 000 bis 30 000 Jahren in der Schlucht von Ménié-Ménié, denn dort fanden sich Tausende von Steinabschlägen, den bei der Klingenfertigung übrig bleibenden Kernsteinen und Quarzabfälle auf nur wenigen Quadratmetern. An diesem Ort verstand man sich auf die aufwändige Levallois-Technik: Ein Kernstein wird einmal vorbereitet, bevor man die erwünschten Werkzeuge abschlägt. Diese Präparation ist bei einem so harten Material wie Quarz besonderes schwierig. Oder anders gesagt: Der Rohstoff war eigentlich für die Levallois-Technik ungeeignet.

Möglicherweise, so glauben die Ausgräber, ist dies ein Hinweis darauf, dass jene Menschen Migranten waren, die ihre traditionelle Technik mitbrachten. Auch der rasche Wechsel der Steinbearbeitungstechniken in den zeitlich dicht aufeinander folgenden Siedlungsschichten spricht für einen häufigen Wechsel der Bevölkerung auf dem Dogon-Plateau während der mittleren Altsteinzeit. Der Grund: Vermutlich kehrten die Trockenheit und damit die karge Dornbuschsavanne der Sahelzone immer wieder zurück und vertrieben die gerade dort Ansässigen.

YVES G. REYMOND



ERIC HUYSECOM

E. MARTINEZ

Diese unscheinbare Tonscherbe (oben) aus der Schlucht Hibou (großes Foto) im Bereich des Fundplatzes Ounjougou lag unter 15 Meter Sediment begraben. Sie ist mehr als 11 500 Jahre alt, wurde also Jahrtausende vor der ältesten bekannten Keramik des Nahen Ostens gebrannt.

standen dort Seen und Sümpfe, aber auch weitläufige Ebenen, in denen nahrhafte Gräser gediehen. Sie zu ernten war eine Sache. Das Korn trocken und vor Nagern geschützt aufzubewahren, vor allem aber auch zu kochen, um die Stärke darin aufzuschließen, war eine andere. Wohl deshalb wurde die Keramik auf dem heute zur Sahelzone gehörenden Dogon-Plateau vor 12 500 bis 11 500 Jahren erfunden. Einen Wechsel in der Ernährungsweise bestätigen auch ausgegrabene Mahlgeräte (die ältesten sind 10 000 Jahre alt): Sie sind größer und auch sorgfältiger bearbeitet als Mahlsteine und Läufer der Altsteinzeit, die nicht zum Zerkleinern von Getreide, sondern zur Herstellung von Farbpigmenten gedient hatten.

Neuerlicher Klimawandel

Scherben an Fundplätzen im Niltal und in der südlichen Sahara verraten, dass der Mensch zu Beginn des 9. Jahrtausends v. Chr. begann, die in der langen Trockenzeit verlorenen nördlichen Gebiete von Westafrika und der wiederergrünten Sahara aus zurückzuerobern. Die Keramiken tragen hauptsächlich flächige Verzierungen, zeigen aber bereits eine große Vielfalt an Motiven und Techniken. Spätestens zu Beginn des 8. Jahrtausends v. Chr. waren die Zentralsahara sowie das heutige Libyen und Algerien erreicht. Auf ihrem Weg dorthin hatten die Menschen neue Verzierungstechniken für ihre Gefäße entwickelt: Linienmuster wurden in den Ton geritzt, Lochmuster eingedrückt sowie bandartige Dekorationen mit schnurumwickelten Stäbchen angelegt.

Offenbar boten Wildgräser eine so gute Nahrungsgrundlage, dass der Ackerbau noch kein Thema war. Hingegen kam im Grasland der nach wie vor feuchten Sahara die Rinderzucht auf, wie Felsbilder in der Zentralsahara illustrieren.

Im 4. Jahrtausend v. Chr. setzte ein neuerlicher Klimawandel ein, der die Sahara über mehr als 3000 Jahre hinweg austrocknen ließ. Menschen, die verschiedenen Kulturen angehörten und vermutlich nicht einmal die gleiche Sprache sprachen, wurden in die verbliebenen fruchtbaren Regionen – wie das Niltal, die Meeresküsten oder die Savannen – vertrieben. Sie brachten Rinder, Schafe und Ziegen mit, zudem das Wissen, wie Sämlinge auszuwählen und Ackerflächen vorzubereiten sind: Das Ernten von Wildgetreide deckte den Bedarf nicht mehr, das Wissen um den Ackerbau war aber wohl bereits vorhanden. Einige dieser Gruppen aus der Sahara suchten vor 4400 Jahren in der Region von Ounjougou am Fluss Yamé Zuflucht (ihre Herkunft erkennen wir anhand ihres für nördlichere Gebiete typischen Keramikstils). Sie kannten bereits den Anbau der Perlhirse *(Pennisetum glaucum)*, wie die Archäobotanikerinnen Katharina Neumann und Barbara Eichhorn von der Universität Frankfurt nachwiesen.

Erst in dieser Phase würde ein an »europäische Standards« gewohnter Archäologe von Neolithisierung sprechen. Offenbar aber kam dieser Prozess Jahrtausende vorher auf dem Dogon-Plateau in Gang, die Sahara spielte überdies eine Schlüsselrolle bei der Ausbreitung von Viehzucht und Getreideanbau. Ob diese frühen Entwicklungen in andere Regionen der Welt ausstrahlten? Afrika dürfte noch manche Überraschung bereithalten. ◁

Der Ethnoarchäologe und Prähistoriker **Èric Huysecom** von der Université de Genève leitet das Forschungsprojekt »Bevölkerungs- und Umweltgeschichte in Westafrika«, das schwerpunktmäßig auf dem Dogon-Plateau arbeitet. Huysecom lehrt zudem Geschichte und Archäologie an der Universität Bamako (Mali).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/960477.

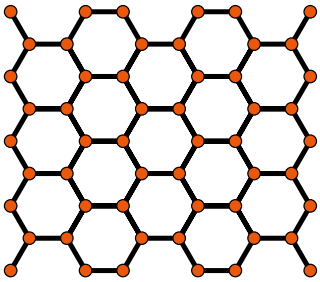
Gepflasterte Materie

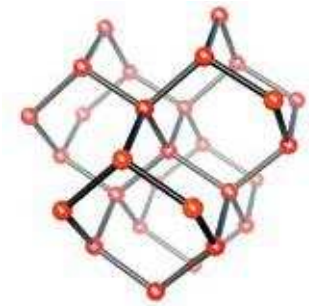
Um kristalline Materialien besser zu verstehen, suchen Chemiker und Kristallografen nach ganzheitlichen Beschreibungsmethoden für deren atomare Struktur. Scheinbar längst überholte Ideen vom Aufbau der Materie stellen sich als hilfreich heraus.

Von Olaf Delgado-Friedrichs

Graphit und Diamant, eines der weichsten und eines der härtesten Minerale, bestehen beide aus reinem Kohlenstoff. Wie kommen diese krassen Härteunterschiede zu Stande? Die Antwort liegt offenbar in der unterschiedlichen Anordnung der Kohlenstoffatome in den beiden Materialien.

Im Graphit lagern sie in Schichten, von denen jede einem regelmäßigen Bienenwabenmuster gleicht (Bild links, oben). Die Atome einer Schicht sind an ihre nächsten drei Nachbarn in derselben Schicht ziemlich fest gebunden; dagegen gibt es zwischen den verschiedenen Schichten nur schwache Anziehungskräfte. Das erklärt die mangelnde Festigkeit des Bleistiftminerals und seinen leichten Abrieb. Im Diamant dagegen besitzt jedes Atom vier statt drei Bindungsnachbarn (Bild links, unten), die obendrein nicht mehr in einer gemeinsamen Ebene liegen, sondern auf den Ecken eines regelmäßigen Tetraeders. Diese Anordnung ist besonders stabil und macht den Edelstein hart. Wie aber können wir die Lage der Atome im Diamant ganzheitlich, global, beschreiben? Geht das nicht ähnlich anschaulich und kompakt wie bei seinem weichen Gegenstück? Oder müssen wir doch die exakten Atompositionen mit ihren jeweils drei Raumkoordinaten angeben, einen kaum verständlichen Zahlensalat?





Die Anordnung der Atome im Graphit (oben) und im Diamant (unten). Wie üblich sind die Atome durch Kugeln, die Bindungen zwischen ihnen durch Stäbchen wiedergegeben.

Chemiker und Kristallografen suchen schon lange nach koordinatenfreien Beschreibungen. Diese könnten helfen, die chemischen Eigenschaften kristalliner Materialien besser zu verstehen und neue Strukturtypen zu finden. Auch strukturelle Verwandtschaften zwischen Kristallen wären mit ihrer Hilfe leichter aufzuspüren. Eine solche Beschreibung möchte ich Ihnen im Folgenden vorstellen.

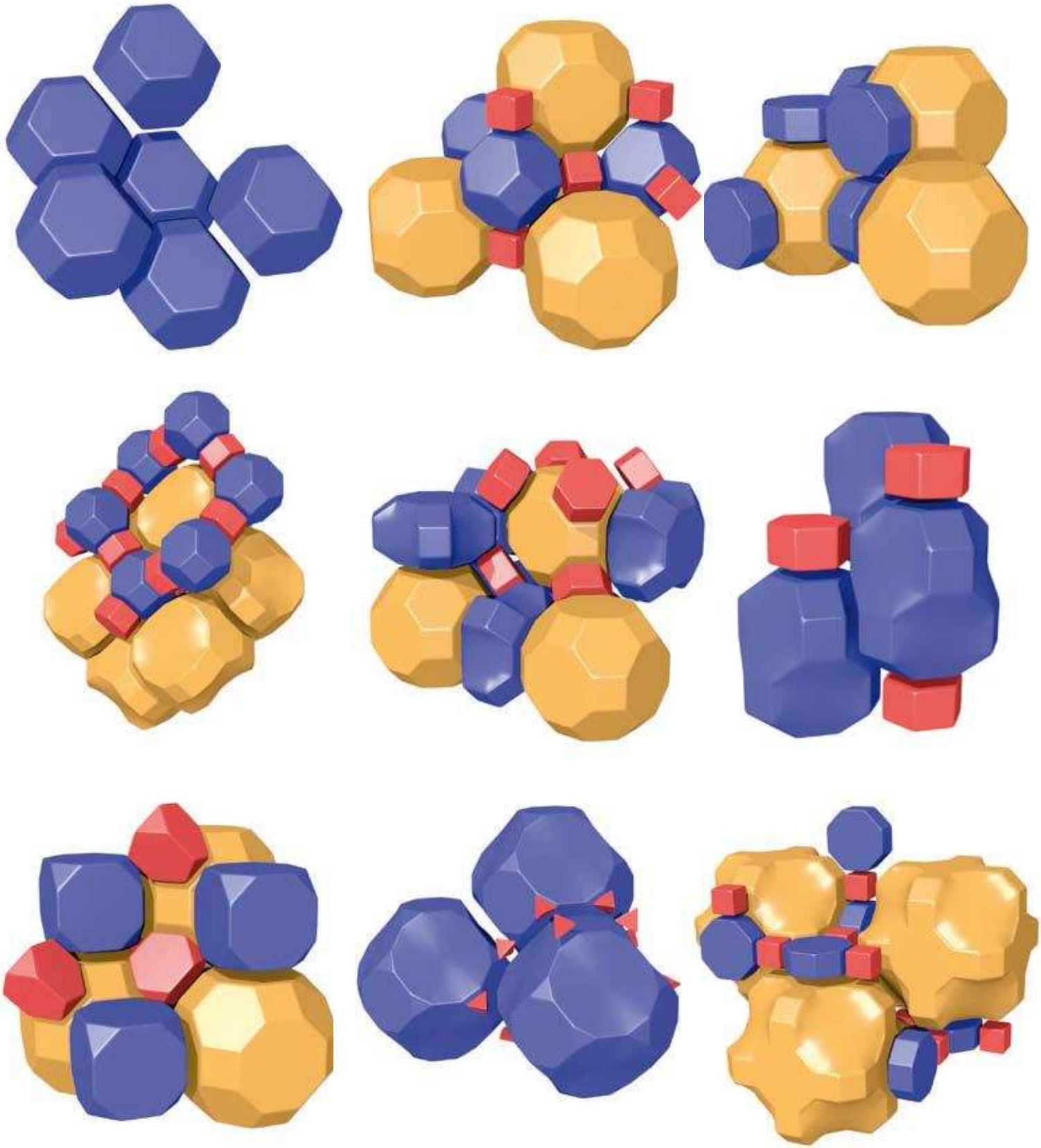
Ein Kristall ist ein Festkörper, in dem die Atome über weite Strecken periodisch angeordnet sind. Man kann ihn sich aus unsichtbaren, mit einer immer gleichen Atomkonstellation gefüllten Kästchen aufgebaut denken, die wie Mauersteine regelmäßig zusammengefügt sind (Bild S. 70 oben). Eine Verschiebung, die einen Mauerstein mit seinem nächsten Nachbarn zur Deckung bringt, tut dies auch mit dem gesamten Kristall – sofern wir uns diesen nur unendlich fortgesetzt und ohne Störungen in seiner regelmäßigen Struktur vorstellen. Sie ist eine Symmetrieabbildung oder kurz Symmetrie des Kristalls.

Ein Kristall hat drei Verschiebungssymmetrien in Richtungen, die nicht alle in einer Ebene liegen, plus möglicherweise weitere Symmetrien. Kombiniert man mehrere Symmetrien miteinander, so erhält man wieder eine Symmetrie. Die Menge aller Symmetrien eines (idealisierten) Kristalls ist eine Gruppe im mathematischen Sinn, seine Symmetriegruppe.

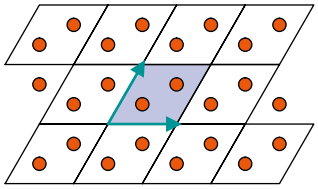
Wendet man auf einen Baustein sämtliche Symmetrien an, so pflastern die entstehenden Kopien des Bausteins den Raum, das heißt, sie füllen ihn lückenlos und ohne Überschneidungen aus. Den Urbaustein nennt man Fundamentalbereich. Kennen wir also die Symmetrien und die Atome im Fundamentalbereich, so kennen wir den kompletten Aufbau des Kristalls.

Es gibt meist noch viele weitere Symmetrien: außer Verschiebungen auch Drehungen, Spiegelungen und Kombinationen dieser Typen. Hat ein Kristall solche zusätzlichen Symmetrien, so genügt ihm ein kleinerer Fundamentalbereich (Bild S. 70 Mitte).

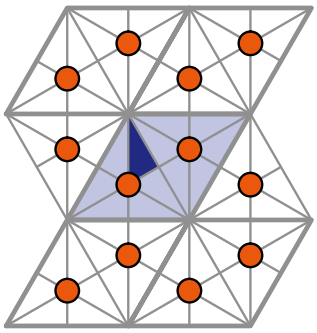
ALLE ABBILDUNGEN DIESES ARTIKELS: OLAF DELGADO-FRIEDRICHS



Unter diesen neun Pflasterungen (lückenlosen Füllungen) des Raums mit Steinen aus einem kleinen Sortiment stellen die sechs oberen die Kristallstrukturen spezieller Mineralien dar, der Zeolithe. Man stelle sich in jeder Ecke der Pflasterung ein Silizium- oder Aluminiumatom vor. Wo in der Pflasterung eine Kante zwischen zwei Ecken verläuft, sind die zugehörigen Atome über ein dazwischenliegendes Sauerstoffatom aneinander gebunden. Die unteren drei Pflasterungen gehören nicht zu Zeolithkristallen, sind aber mathematisch vom selben Typ.

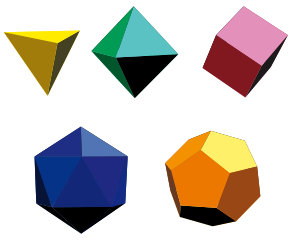


Der Fundamentalbereich dieses auf die Ebene beschränkten Kristalls (hellblau) enthält genau zwei Atome. Der ganze Kristall entsteht durch mehrfache Translation des Fundamentalbereichs mit den beiden grün eingezeichneten Vektoren.



Der Fundamentalbereich einer Graphitschicht ist zum Beispiel das dunkelblau dargestellte Dreieck. Eine Spiegelung an einer Dreiecksseite führt zum jeweiligen Nachbardreieck; durch fortgesetztes Spiegeln wird die ganze Ebene ausgefüllt.

Die fünf platonischen Körper Tetraeder, Oktaeder, Würfel, Ikosaeder und Dodekaeder



Es gibt nur 230 mögliche Arten von (dreidimensionalen) Symmetriegruppen. Das Standard-Tafelwerk, die »International Tables«, in dem sie alle aufgeführt sind, enthält verschiedene Konventionen, die es erlauben, die Symmetrien eines Kristalls in sehr kompakter Weise zu beschreiben. Man braucht dann eigentlich nur noch den Namen der Symmetriegruppe und einige Winkel und Längen anzugeben.

Die Beschreibung eines Kristalls durch Atompositionen und Symmetrien ist sehr nützlich, aber nicht besonders anschaulich. Sie gleicht ein wenig der alten Malbuchaufgabe, in der nummerierte Punkte scheinbar wahllos auf einem Blatt verteilt sind. Erst wenn man die Punkte in der angegebenen Reihenfolge verbindet, erkennt man plötzlich konkrete Formen. Was aber ist die Malanweisung, mit der wir die Form eines Kristalls besser verstehen können? Merkwürdigerweise kommen uns Ideen aus der griechischen Antike dabei zu Hilfe.

Gepackte Atome

Schon der Philosoph Platon (428–348 v. Chr.) erklärte das Wesen der Materie mit Hilfe der Geometrie. Seine Atome waren die regulären konvexen Polyeder, die man heute platonische Körper nennt (Bild links unten). Sein Schüler Aristoteles (384–322 v. Chr.) aber widersprach: Hätte Platon Recht, dann müssten sich viele Exemplare eines jeden platonischen Körpers lückenlos Fläche an Fläche zusammenfügen und so den Raum pflastern. Die Vorstellung, dass es überhaupt unausgefüllten Raum geben könnte, erschien ihm völlig widersinnig. Und von allen platonischen Körpern seien nur der Würfel und das Tetraeder fähig, den Raum zu pflastern. Dieses Argument galt damals als stichhaltig, womit Platons elegante Lehre praktisch zur Bedeutungslosigkeit verurteilt war.

Fast zweitausend Jahre nach Platon griff Johannes Kepler (1571–1630) die Frage nach dem Aufbau der Materie mit einem neuen Gedanken wieder auf. Kepler versuchte die Struktur einer Schneeflocke durch eine regelmäßige Konstellation von sich berührenden Kugeln zu beschreiben. Da die Vorstellung von Löchern im Aufbau der Materie auch den damaligen Gelehrten nicht behagte, presste Kepler die Kugelformation in Gedanken so lange gleichmäßig zusammen, bis die Lücken verschwanden und aus den Kugeln konvexe Polyeder geworden waren. Es entstand eine Pflasterung, die Kepler auf Grund der Anordnung der Kugeln genau beschreiben konnte. Im Gegensatz zu Platon und Aristoteles stand hier also die Form der Steine nicht am Anfang, sondern entstand erst als Konsequenz ihrer räumlichen Anordnung.

Entlang ähnlicher Gedankenlinien erarbeiteten abermals einige Jahrhunderte später der russische Mineraloge Jewgraf S. Fedorow (1853–1919) und der deutsche Mathematiker Arthur Schönflies (1853–1928) die vollständige Liste aller so genannten geometrischen Raumgruppentypen, aus der die genannten 230 Arten kristallografischer Symmetriegruppen hervorgingen.

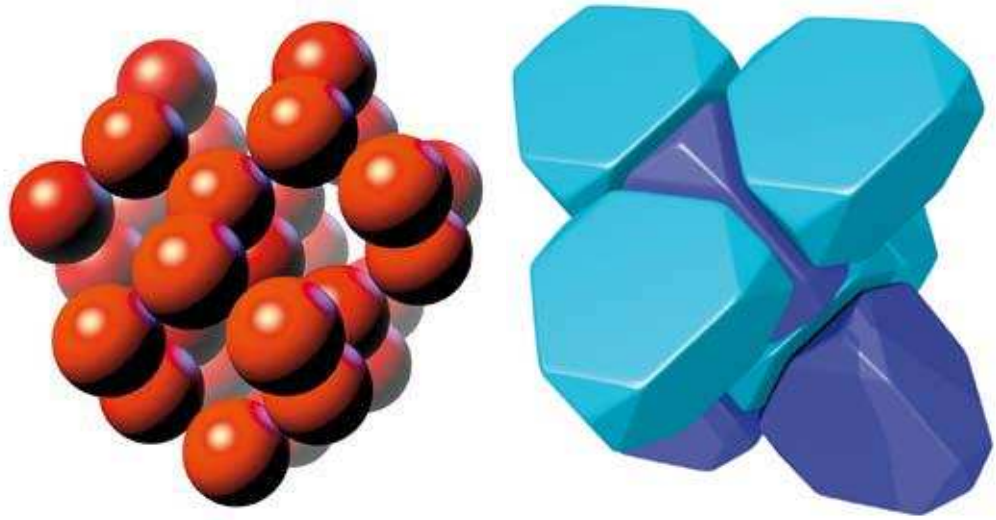
Heute wissen wir, dass die Atome selbst nicht dicht im Raum gepackt sind; aber man kann Keplers Idee mit neuem Sinn versehen. Atome haben eine Art energetische Pufferzone, eine Kugel mit dem so genannten Van-der-Waals-Radius, so dass es häufig sinnvoll ist, Packungen von Kugeln mit diesen Radien als Modelle von Kristallstrukturen zu betrachten. Ähnlich der keplerschen Idee kann man die Kugeln jetzt gleichmäßig wachsen lassen, bis sie den Raum komplett ausfüllen (Bild rechts oben). Die entstehenden Pflastersteine heißen in der Kristallografie »Wirkungsbereiche« und in der Festkörperphysik »Wigner-Seitz-Zellen« (Spektrum der Wissenschaft 11/2007, S. 36, und 12/2007, S. 50). Ihr Nutzen zur Beschreibung von Kristallen ist leider begrenzt, denn erstens können Wirkungsbereiche sehr viele Flächen besitzen (der Rekord liegt zurzeit bei 38), und zweitens kann sich ihre Struktur sehr stark ändern, sobald die Atome im Kristall, zum Beispiel auf Grund neuer Druck- oder Temperaturverhältnisse, auch nur ein wenig anders liegen.

Es gibt Ideen, das Konzept vom Wirkungsbereich zu retten, aber auch komplett andere Ansätze, von denen im Folgenden die Rede sein soll. Möglich gemacht wurden sie durch jüngste Fortschritte in der mathematischen Theorie der Pflasterungen.

Weniger regelmäßige Tetraeder

An einer entscheidenden Stelle hat Aristoteles geirrt. Das regelmäßige Tetraeder pflastert gar nicht den Raum! Der Winkel zwischen zwei benachbarten Tetraederflächen beträgt ungefähr 70,53 Grad. Es passen also fünf Tetraeder um eine Kante, und zwischen ihnen bleibt ein kleiner, aber merklicher Keil.

Aus dem Fehler macht man eine neue Idee, indem man Aristoteles uminterpretiert: Man deformiere die Tetraeder. Um 1920 nahm sich der britische Geometer Duncan Sommerville (1879–1934) systematisch der Frage an, welche konvexen, nichtregulären Tetraeder den Raum pflastern. Seine Idee war einfach: Sommerville wusste, dass jedes dreieckige Prisma auf natürliche Weise den Raum pflastert. Das gilt sogar für schiefe Prismen, also solche, bei



Modell des Diamantkristalls mit Kugelpackungen (links) und Wigner-Seitz-Zellen

denen Boden- und Deckelfläche gegeneinander verschoben sind. Legt man nämlich zwei kongruente Prismen in der richtigen Weise zusammen, so entsteht ein Spat, das ist ein verzerrter Würfel (von Parallelogrammen begrenzter Sechsflächner). Zerlegt man andererseits ein Prisma mit zwei geeigneten Schnitten, so erhält man drei Tetraeder (Bild rechts). Unter geeigneten Bedingungen an die Seitenlängen und Winkel des Prismas sind diese Tetraeder zueinander kongruent oder wenigstens spiegelbildlich kongruent.

Auf diesem Weg fand Sommerville zwei Familien pflasternder Tetraeder. Beide Bausteine lassen sich noch in eine bestimmte Richtung dehnen, ohne dass sie ihre Kongruenz verlieren. Vier weitere Tetraederpflasterungen fand Sommerville durch Zerlegen eines Würfels (Bild rechts unten).

Später wurden Sommervilles Tetraeder mehrfach wiederentdeckt und noch einige neue Lösungen gefunden. Im Jahr 1981 allerdings konstatierte Marjorie Senechal vom Smith College in Northampton (Massachusetts), dass alle bis dahin bekannten tetraedrischen Raumfüller sich durch weiteres Zerschneiden aus einer der Sommerville-Lösungen gewinnen ließen. Sie formulierte die naheliegende Frage, ob diese Liste komplett sei oder ob es noch weitere, bis dahin unbekannte raumfüllende Tetraeder gäbe. Diese Frage ist bis heute nicht vollständig beantwortet. Zumindest aber ein wichtiger Spezialfall wurde, wie wir noch sehen werden, gelöst.

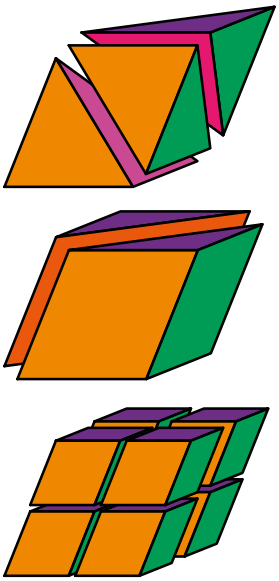
Die Tetraeder in Senechals Liste haben zwei interessante Gemeinsamkeiten. Sie alle, auch die, welche Sommerville ursprünglich aus Würfelzerlegungen gewann, lassen sich in einer geeigneten Anzahl von Exemplaren zu Dreiecksprismen zusammenlegen. Zweitens bildet jedes dieser Tetraeder auch Pflasterungen, in denen nicht nur alle Steine kongruent, sondern sogar symmetrieäquivalent sind. Das heißt, zu je zwei Steinen gibt es eine Symmetrie des ganzen Musters, die den ersten auf den zweiten abbildet. Solche Pflasterungen heißen »isohedral« im Gegensatz zu den »monohedralen«, deren Steine nur kongruent zueinander sein müssen.

Gibt es überhaupt monohedrale Pflasterungen, die nicht isohedral sind? Im Jahr 1900 stand diese Frage noch auf der berühmten Liste der 23 ungelösten Probleme, mit der David Hilbert (1862–1943) der Mathematik des 20. Jahrhunderts den Weg wies. Inzwischen wissen wir, dass es solche weniger regelmäßigen Pflasterungen zuhauf gibt. Sie müssen noch nicht einmal periodisch sein; quasiperiodische und amorphe Pflasterungen sind ein ergiebiges Thema (Spektrum der Wissenschaft 2/2002, S. 64). Im Folgenden beschränken wir uns auf isohedrale Pflasterungen oder sogar »fundamentale«, das sind solche, in denen der Pflasterstein selbst ein Fundamentalbereich ist.

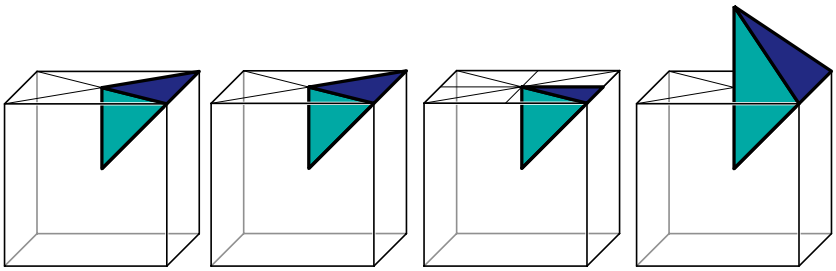
Zwei statt drei Dimensionen

Außerdem gehen wir vorübergehend eine Dimension zurück, betrachten also statt räumlicher Pflasterungen ebene Parkette. Diese lassen sich sehr viel leichter grafisch darstellen und verstehen und haben obendrein angenehme Eigenschaften, welche die Arbeit erleichtern und im Raum nicht mehr gelten. So weiß man heute wesentlich mehr über ebene als über räumliche Pflasterungen.

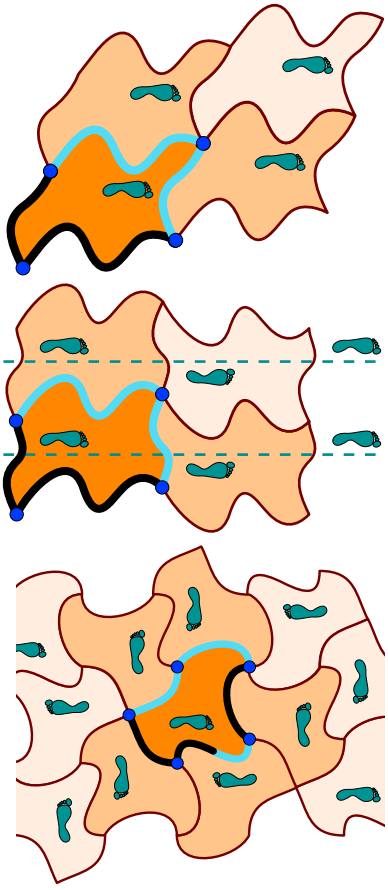
Schon um 1935 fand Heinrich Heesch (1906–1995), ungefähr zeitgleich mit dem russischen Mathematiker Boris Delone (1890–1980), einen Weg, die Gesamtheit aller fundamentalen Parkette in eleganter Weise anzu-



Ein schiefes dreiseitiges Prisma ist in drei – im Allgemeinen nicht kongruente – Tetraeder zerlegbar (oben). Zwei derartige Prismen, Kopf an Fuß zusammengelegt, ergeben einen Spat (Mitte). Der wiederum pflastert durch simple Translationen den Raum (unten).



Man findet Zerlegungen des Würfels in kongruente Tetraeder, indem man ihn entlang verschiedener Symmetrieebenen zersägt.



Der dunkle Urstein wird durch Symmetrien auf seine Nachbarn abgebildet (verdeutlicht durch die Fußabdrücke): im oberen Parkett durch Translationen nach rechts und nach oben, im mittleren durch eine Translation nach oben und eine Gleitspiegelung (Verschiebung plus Spiegelung an der gestrichtelten Linie) nach rechts, im unteren durch Drehungen. In jedem Fall wird ein Teil der Randkurve des Ursteins (dick, schwarz) auf einen anderen Teil derselben (dick, hellblau) abgebildet und legt diesen dadurch fest.

geben. Sein vollständiger Beweis erschien allerdings erst im Jahr 1968. Heesch beschränkte sich nicht auf Parkette nur aus Vielecken, sondern erlaubte Steine, deren Ränder im Prinzip beliebige Kurven sein können. Dabei stellte er fest, dass nur ungefähr eine Hälfte des Randes sich frei wählen lässt. Die verbleibende Hälfte ist dann durch die Symmetrien bereits festgelegt (Bild links).

Heesch ersann schließlich ein System, mit dem sich der Aufbau eines Fundamentalparketts durch die Art und Reihenfolge der Nachbarsymmetrien vollständig beschreiben ließ. Er fand insgesamt 46 verschiedene Typen und leitete für jeden ein vollständiges Regelwerk ab, das alle seine möglichen Bausteinformen beschreibt. Damit hatte er die Gesamtheit aller fundamentalen Parkette in übersichtlicher Weise dargestellt.

Leider lässt sich Heeschs System nicht besonders gut verallgemeinern. Will man Parkette mit mehr als einem Urstein oder räumliche Pflasterungen bearbeiten, braucht man neue Ideen.

Um 1970 begannen Branko Grünbaum von der University of Washington in Seattle und Geoffrey Shephard von der University of East Anglia in Norwich (England) mit dem intensiven Studium der Parkette. Wie Heesch und viele andere mussten auch sie häufig für neue Probleme komplett neue Formalismen entwickeln. Gemeinsam mit zwei Kollegen veröffentlichten sie 1985 eine Liste von über 500 2-isohedralen Parketten; das sind solche, bei denen jeder Stein symmetrieäquivalent zu einem von zwei Ursteinen ist. Aber sie hatten keinen Weg gefunden, alle möglichen Parkette dieser Art systematisch aufzuzählen.

Doch schon im folgenden Jahr schrieb in Bielefeld der Mathematikstudent Daniel Huson (heute Professor für Bioinformatik an der Universität Tübingen) im Rahmen seiner Diplomarbeit ein Computerprogramm, das nicht nur die Liste Grünbaums und seiner Mitarbeiter reproduzierte, sondern auch ihre Vollständigkeit bewies. Was war geschehen?

Die Antwort trägt den etwas sperrigen Namen »Delaney-Dress-Symbol« und stammt von Husons Betreuer und späterem Doktorvater, dem Bielefelder Mathematiker Andreas Dress, der eine Anregung des Amerikaners Matthew Delaney aufgriff. Ihre ersten Ursprünge finden sich ironischerweise schon bei Platon. Dieser nämlich hatte die Oberflächen seiner Polyeder-Atome folgendermaßen weiter zerlegt: Man verbinde den Mittelpunkt jeder Fläche durch gerade Linien mit allen ihren Ecken sowie den Mittelpunkten ihrer Randkanten. So erhält man eine Triangulierung der Oberfläche, eine Zerlegung in kleine, in diesem Fall rechtwinklige Dreiecke, gewissermaßen die subatomaren Partikel der platonschen Theorie. Zur Unterscheidung von den Polyederflächen nennen wir diese Partikeldreiecke »Kammern«. So wie die Flächen von Polyedern kann man auch die Steine eines (aus Vielecken bestehenden) Parketts in Kammern zerlegen (Bild rechts oben, links).

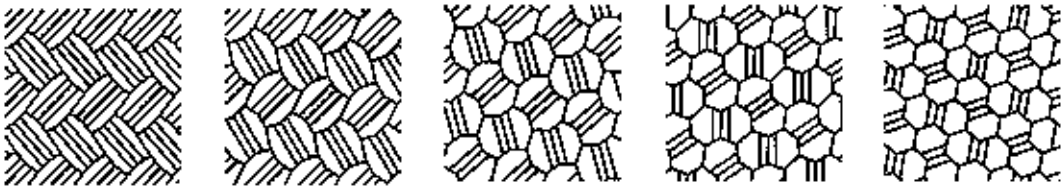
Um später beim Zusammensetzen keine Fehler zu machen, führt man zweckmäßig einen Farbkode ein. Kammernecken, die auch Ecken des Polygons bilden, werden rot gefärbt, Kantenmittelpunkte grün und Flächenmittelpunkte blau. Es dürfen stets nur rote an rote, grüne an grüne und blaue an blaue Ecken gelegt werden. Noch übersichtlicher wird es, wenn wir auch jede Kante mit der Farbe der ihr gegenüberliegenden Ecke versehen.

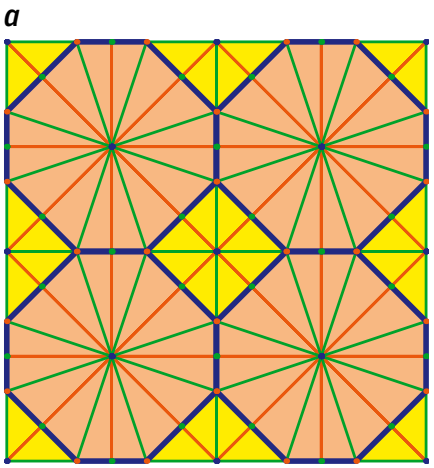
Kombinatorische Analyse

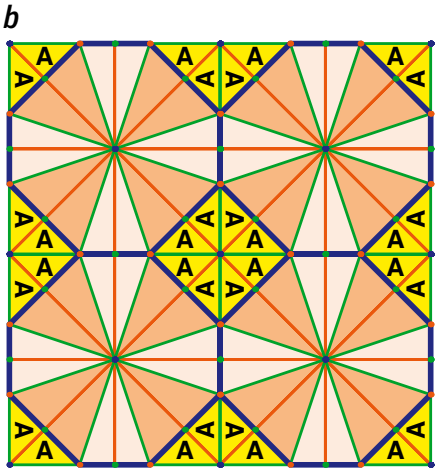
Wir analysieren nun die Symmetrie des Musters und belegen alle symmetrieäquivalenten Kammern mit jeweils gleichen Buchstaben (Bild rechts oben, Mitte). Wie sich herausstellt, kommen wir mit den drei Buchstaben *A*, *B* und *C* aus. Wir sehen, dass zum Beispiel an der blauen Kante einer Kammer vom Typ *A* immer eine Kammer vom Typ *B* anliegt und umgekehrt. Um die Struktur des Parketts, oder genauer seiner Kammernzerlegung, zu beschreiben, müssen wir nur alle solche Nachbarschaftsbeziehungen für alle Kammerntypen angeben (Bild rechts oben, rechts).

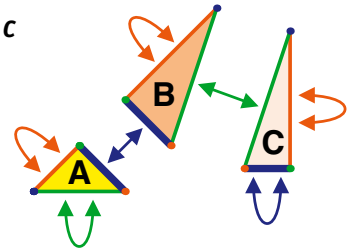
Wir wollen schließlich ganz im Sinne Heeschs von den tatsächlichen Steinformen absehen und stattdessen den grundsätzlichen Aufbau eines Parketts herausarbeiten. Ohne die Formen der Kammern aber fehlt uns eine entscheidende Information: Wie viele Kammern liegen um eine gemeinsame Ecke?

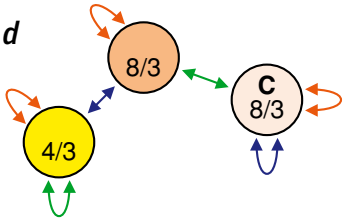
Anders ausgedrückt: Man wähle zunächst ein Paar von Farben, zum Beispiel Rot und Grün, und eine Startkammer. Nun laufe man immer zur jeweils benachbarten Kammer, indem man abwechselnd eine rote und eine grüne Kante, niemals aber eine blaue überquert. Die Anzahl der Rot-Grün-Doppelschritte zurück zur Startkammer notieren wir als deren Rot-Grün-Wert, geschrieben z_{rg}. Entsprechend ist der Grün-Blau-Wert z_{gb} einer Kammer definiert. Der Rot-Blau-Wert ist stets 2 und muss daher nicht eigens angegeben werden.











Auch für die platonischen Körper kann man die Zahlen z_{rg} und z_{gb} so bestimmen. Die erste gibt an, wie viele Ecken eine bestimmte Fläche hat, und die zweite den Grad einer Ecke, also die Anzahl der Flächen, die dort zusammenkommen. Da es jeweils nur eine Kammersorte gibt, erhalten wir für jeden der fünf Körper ein charakteristisches Zahlenpaar, nämlich (3, 3) für das Tetraeder, (3, 4) für das Oktaeder, (3, 5) für das Ikosaeder, (4, 4) für den Würfel und schließlich (5, 3) für das Dodekaeder. Solche Zahlenkodes sind unter dem Namen »Schläfli-Symbole« (nach dem Schweizer Mathematiker Ludwig Schläfli, 1814–1895) bekannt und wurden zur Klassifikation von regulären Körpern höherer Dimension, »platonischen« Parkettierungen oder auch Spiegelungsgruppen eingesetzt. Die Neuerung, mit der Dress nun auch wesentlich kompliziertere Pflasterungen handhabbar machte, war die Einführung von Bauplänen mit mehr als einem Bauelement, von denen jedes gewissermaßen mit einem eigenen Schläfli-Symbol versehen ist (Bilder oben).

Ein solcher Bauplan beschreibt nun eine ganze Familie von Parketten, die »äquivariante Äquivalenzklasse« heißt. Zwei Parkette sind äquivariant äquivalent, wenn sie sich unter Beibehaltung ihrer Symmetrien ineinander verformen lassen. Man stellt sich dabei vor, dass man das erste Parkett auf eine Art Gummihaut zeichnet und diese so lange dehnt und staucht, bis es dem zweiten gleicht. Zum Beispiel kann man alle Rauten unserer Beispielpflasterung gleichmäßig vergrößern oder verkleinern oder sogar nach außen wölben, bis sie zu Kreisen werden, ohne die äquivalente Äquivalenzklasse zu verlassen. Dabei ändern sich auch die Formen der gedachten Schablonen für die einzelnen Kammerntypen. Der Bauplan aber, das Delaney-Dress-Symbol des Parketts, bleibt der gleiche. Die dressschen Baupläne verhalten sich in dieser Hinsicht exakt wie die von Heesch, nur sind sie wesentlich vielseitiger einsetzbar.

Paare äquivalenter Pflasterungen kann man nicht immer auf den ersten Blick erkennen. Ein sehr instruktives Beispiel hierfür stammt von Lothar Collatz (1910–1990), der für seine Arbeiten in der numerischen Mathematik bekannt ist, sich aber auch für Parkette interessierte. Collatz wandte sich an Dress und Huson, nachdem er mit den ihm bekannten Methoden nicht entscheiden konnte, ob zwei bestimmte Muster äquivalent seien. Mit Hilfe der Delaney-Dress-Symbole konnte das Problem schnell gelöst werden – die Antwort ist Ja –, und wir fanden später sogar eine explizite Deformation zwischen den beiden Parketten (Bildfolge unten).

Metabaupläne

Um nun alle Pflasterungen – oder besser: alle äquivarianten Äquivalenzklassen – mit einer bestimmten Eigenschaft zu finden, genügt es, alle zu dieser Eigenschaft passenden Baupläne aufzuzählen. Damit hat man aus einem geometrischen Problem ein wesentlich leichteres kombinatorisches gemacht.

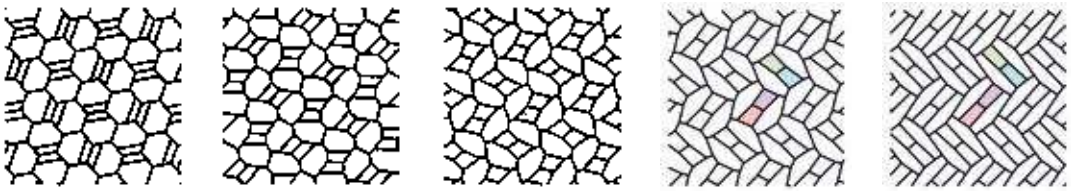
Die weitere Vorgehensweise ist theoretisch sehr einfach. Man nehme eine leere Tabelle nach dem Muster vom Bild oben und probiere mit einem Computer sämtliche Möglichkeiten durch, die Felder der Tabelle zu füllen. Dann ist man zwar sicher, dass man keinen möglichen Bauplan übersehen hat – aber möglicherweise wird der Computer mit seiner Arbeit in Jahrtausenden nicht fertig, weil die Anzahl der möglichen Kombinationen ins Unermessliche steigt (die »kombinatorische Explosion«). Unter den möglichen Kombinationen von Tabelleneinträgen ergibt nur eine sehr kleine Minderheit gültige Baupläne. Man muss also Bedingungen finden, die ein gül-

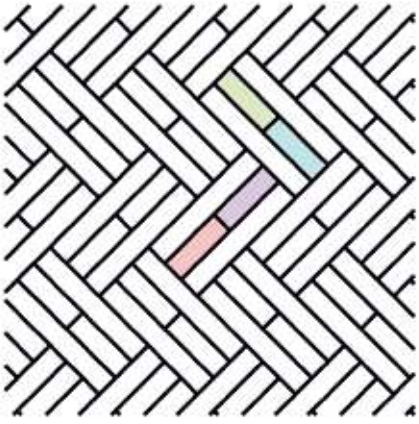
e

	N_r	N_g	N_b	z_{rg}	z_{gb}
A	*A*	*A*	*B*	4	3
B	*B*	*C*	*A*	8	3
C	*C*	*B*	*C*	8	3

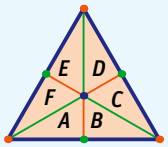
Wie jedes Parkett aus Polygonen lässt sich auch das beliebte Badezimmerkachelmuster aus Achtecken und Quadraten in Kammern zerlegen (*a*). Es gibt nur drei Sorten *A*, *B* und *C* von Kammern (*b*). Die Kammerformen zusammen mit den Nachbarschaftsbeziehungen (*c*) ergeben einen vollständigen Bauplan des Parketts als Diagramm (*d*) und als Tabelle zur besseren Verwendung mit einem Computer (*e*). N_r bedeutet »roter Nachbar« und so weiter.

Diese beiden Parkette (links und rechts) von Lothar Collatz sind äquivalent, denn sie lassen sich durch eine stetige Deformation (kleine Bilder) ineinander überführen.





Alle Baupläne für fundamentale Dreieckspflasterungen

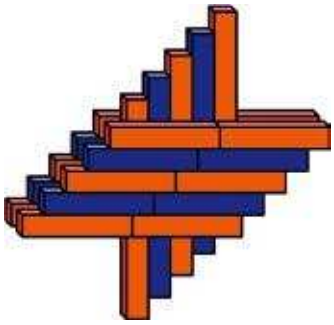


Wir zerlegen den noch unbekannten Urstein unseres Parketts in die Kammern *A* bis *F*. Damit sind die roten und grünen Nachbarn jeder Kammer bereits festgelegt. Aber die Möglichkeiten, die zwölf verbleibenden Leerstellen der Tabelle auszufüllen, würden immer noch jeden Computer überfordern.

Wenn *D* der blaue Nachbar von *A* ist, dann kann der blaue Nachbar von *B* nur noch *C* sein, und so weiter. Geometrische Bedingungen dieser Art reduzieren die Anzahl der Möglichkeiten, die vierte Tabellenspalte zu füllen, von $6^6 = 46\,656$ auf 20. Davon bleiben noch 8 übrig, die nicht durch schlichte Umbenennung der Kammern *A* bis *F* auseinander hervorgehen.

Die zunächst unendlich vielen Möglichkeiten, die letzte Tabellenspalte zu füllen, reduzieren sich auf ähnlich drastische Weise durch die Bedingung, dass die Dreiecke, die um einen Punkt herum liegen sollen, dort auch Platz finden müssen: Die Summe der diesem Punkt anliegenden Innenwinkel muss 360 Grad sein, was sich in eine Gleichung für die Werte z_{rg} und z_{gb} umformulieren lässt. Insgesamt bleiben 13 Baupläne für Dreiecksparkette übrig.

	N_r	N_g	N_b	z_{rg}	z_{gb}
A	*B*	*F*	...	3	...
B	*A*	*C*	...	3	...
C	*D*	*B*	...	3	...
D	*C*	*E*	...	3	...
E	*F*	*D*	...	3	...
F	*E*	*A*	...	3	...



Diese isohedrale Pflasterung des Raums nach Heinrich Heesch besteht aus lauter gleichen Stäben mit den Kantenlängen 1, 1 und 5. Ein liegender Stab berührt je fünf stehende vor und hinter sich sowie sechs Stäbe in seiner eigenen Ebene.

tiger Bauplan erfüllen muss, und geeignete Abkürzungen sowohl mathematischer als auch algorithmischer Art entwickeln (Kasten oben), so dass es nur noch eine erträgliche Anzahl an Möglichkeiten durchzuprobieren gibt. Dies gilt schon für den zweidimensionalen Fall, wird aber noch ungleich wichtiger bei der Arbeit mit dreidimensionalen Pflasterungen.

Leider reicht, obwohl dies häufig angenommen wird, die Kenntnis der in Frage kommenden Symmetriegruppen beileibe nicht aus, um auch die Vielfalt aller räumlichen Pflasterungen zu verstehen. Auch viele der Ergebnisse aus der ebenen Theorie gelten nicht mehr. So gibt es in der Ebene für jede natürliche Zahl *k* nur endlich viele Baupläne mit maximal *k* Urpflastersteinen. Im krassen Gegensatz hierzu konstruierte Heesch im Jahr 1934 eine unendliche Folge isohedraler räumlicher Pflasterungen (Bilder links und rechts). Selbst wenn man sich im Gegensatz zu Heesch darauf beschränkt, die Steine Fläche an Fläche aneinanderzusetzen, gibt es unendlich viele Pflasterungen, wenn man nichtkonvexe Pflastersteine mit möglicherweise sogar nichtebenen Flächen zulässt.

Immerhin konnte Delone 1961 zeigen, dass ein konvexer Pflasterstein, der Fläche an Fläche verbaut eine isohedrale Pflasterung bildet, höchstens 390 Flächen besitzen kann. Wie lückenhaft unsere Kenntnisse sind, zeigt die Tatsache, dass die größten bekannten Beispiele nur ganze 38 Flächen haben. Sie wurden von dem Kristallografen Peter Engel als Wirkungsbereiche symmetrischer Punktmuster gefunden.

Die tatsächliche Obergrenze kennt bisher niemand. Fest aber steht, dass schon die Anzahl der isohedralen Pflasterungen mit konvexen Steinen astronomisch hoch sein muss. Es ist also im Raum einfach aussichtslos, alle isohedralen Pflasterungen aufzählen zu wollen. Wir müssen bescheidenere Fragen angehen. Zum Beispiel: Auf welche Arten (wenn überhaupt) pflastert ein bestimmter, vorgegebener Stein? Ähnlich wie im zweidimensionalen Fall stellen wir uns diesen als beliebig verformbaren Gummikörper vor.

Das führt unter anderem zu einer neuen Interpretation der aristotelischen Frage, die Daniel Huson und ich Mitte der 1990er Jahre angingen: Auf welche Weise kann der Raum isohedral mit deformierten platonischen Körpern gepflastert werden? Die Spielregeln sind folgende: Die Flächen, Kanten und Ecken des ursprünglichen Körpers denken wir uns auf der verformten Version wie auf einer Landkarte markiert. Beim Zusammensetzen müssen immer komplette »Länder« aufeinander zu liegen kommen. Außerdem dürfen Kanten nur auf Kanten und Ecken nur auf andere Ecken gelegt werden.

Alle Pflasterungen mit deformierten platonischen Körpern

Man kann eine solche Karte als zweidimensionale Pflasterung der Steinoberfläche verstehen, die durch einen passenden Bauplan beschrieben wird. Die Kammernzerlegung denkt man sich in das Innere des Steins bis zu einer gemeinsamen neuen Ecke fortgesetzt, so dass schließlich tetraedrische Kammern entstehen. Für die neuen Kammernecken benötigen wir eine neue Markierungsfarbe, sagen wir Ocker. Ähnlich wie zuvor färben wir nun außerdem jede Tetraederseite in der Farbe der ihr gegenüberliegenden Ecke (Bild rechts oben).

Das weitere Vorgehen ist völlig analog zum zweidimensionalen Fall: Für jede der vier Seiten einer Kammer müssen wir den jeweiligen Nachbarn angeben. Außerdem brauchen wir

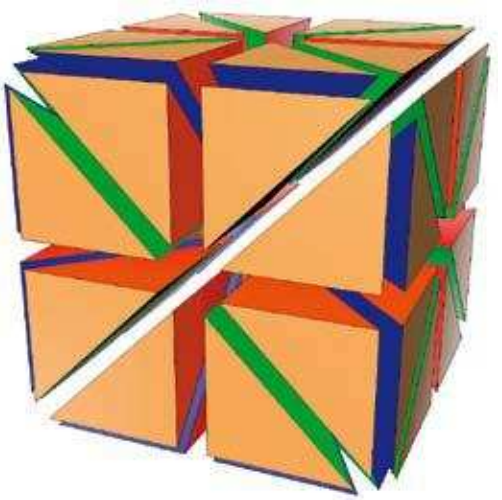
für jedes Paar von Farben die Anzahl der Doppelschritte, die zur Ursprungskammer zurückführen. Pro Kammer können nur drei dieser Werte von 2 verschieden sein: z_{rg}, z_{gb} und z_{bo}. Dabei gibt der Wert z_{bo} an, wie viele Steine an einer gemeinsamen Kante liegen. Die meisten Einträge kann man einfach vom zweidimensionalen Bauplan für die Steinoberfläche übernehmen. Ähnlich wie im Beispiel der Dreieckspflasterungen müssen wir die zwei noch unbelegten Spalten N_o und z_{bo} auf alle möglichen Arten füllen und am Ende prüfen, welche der entstandenen Baupläne für räumliche Pflasterungen taugen.

Damit aber nicht genug. Mit dem gewählten Basisbauplan nämlich erzeugen wir bisher nur fundamentale Pflasterungen. Um dagegen alle Pflasterungen mit einer vorgegebenen Steinstruktur zu finden, müssen wir auch Lösungen berücksichtigen, bei denen einige Symmetrien der fertigen Pflasterungen den Stein auf sich selbst zurückwerfen. Solche Symmetrien sind automatisch auch Symmetrien des Pflastersteins. Es genügt also, zusätzlich alle (kleineren) Baupläne aufzustellen, die zu symmetrischeren Versionen desselben gehören. Für das Tetraeder sind das insgesamt zehn.

Wieder gilt es, die zunächst unendliche Vielfalt der möglichen Ausfüllungen in der letzten Tabellenspalte – der z_{bo}-Werte – einzuschränken. Dabei hilft die so genannte kristallografische Restriktion (die übrigens auch schon in der Ebene gilt): Keine Drehsymmetrie eines periodischen Musters kann einen anderen Grad als 2, 3, 4 oder 6 haben.

Wie finden wir Drehsymmetrien im Bauplan wieder? Das ist ganz einfach: Die Achse einer Drehung kann immer nur entlang von Kammernkanten verlaufen. Man erkennt sie daran, dass eine bestimmte Anzahl von Zwei-Farben-Doppelschritten von einer Ausgangskammer zu einer desselben Typs, aber nicht der Ausgangskammer selbst führt. Der Quotient aus den jeweiligen Doppelschrittzahlen entspricht gerade dem Drehgrad. Nach dem Ausfüllen der N_o-Spalte ist aber die erste, kleinere Blau-Ocker-Doppelschrittanzahl für jede Kammer bekannt. Wir dürfen also nur noch diesen Wert selbst oder sein 2-, 3-, 4- oder 6-Faches in die z_{bo}-Spalte eintragen.

So produziert der Computer schließlich eine relativ große Anzahl von Bauplänen. Aus ihnen müssen wir die gültigen, das heißt im üblichen euklidischen Raum durchführbaren, herausfischen. Leider geht dies nicht mehr mit einer einfachen Rechnung wie im Zweidimensionalen. Das Realisierbarkeitsproblem für räumliche Pflasterungen ist sogar so schwierig, dass wir es in der Praxis nur durch so genannte Heuristiken lösen können. Das sind Algorithmen, die zwar erfahrungsgemäß häufig gut funktionieren, für die es aber keine mathematisch verbürgte Erfolgsgarantie gibt.



Kammernzerlegung am Beispiel eines Würfels

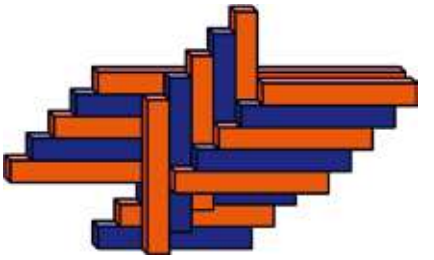
Man kann zum Beispiel zu einem vorgelegten Bauplan einen einfacheren suchen, der genau dann gültig ist, wenn es der ursprüngliche war. Dazu kann man zwei benachbarte Steine, die nicht symmetrieäquivalent sind, zu einem einzigen verschmelzen und so die an der gemeinsamen Seitenfläche anliegenden Kammern einsparen.

Es gibt noch andere ähnliche Modifikationen, die man einfach der Reihe nach durchprobiert, bis keine mehr den Bauplan weiter verkleinern kann. Mit etwas Glück erhält man am Ende einen Plan, der ohne größere Schwierigkeiten als gültig oder ungültig erkennbar ist.

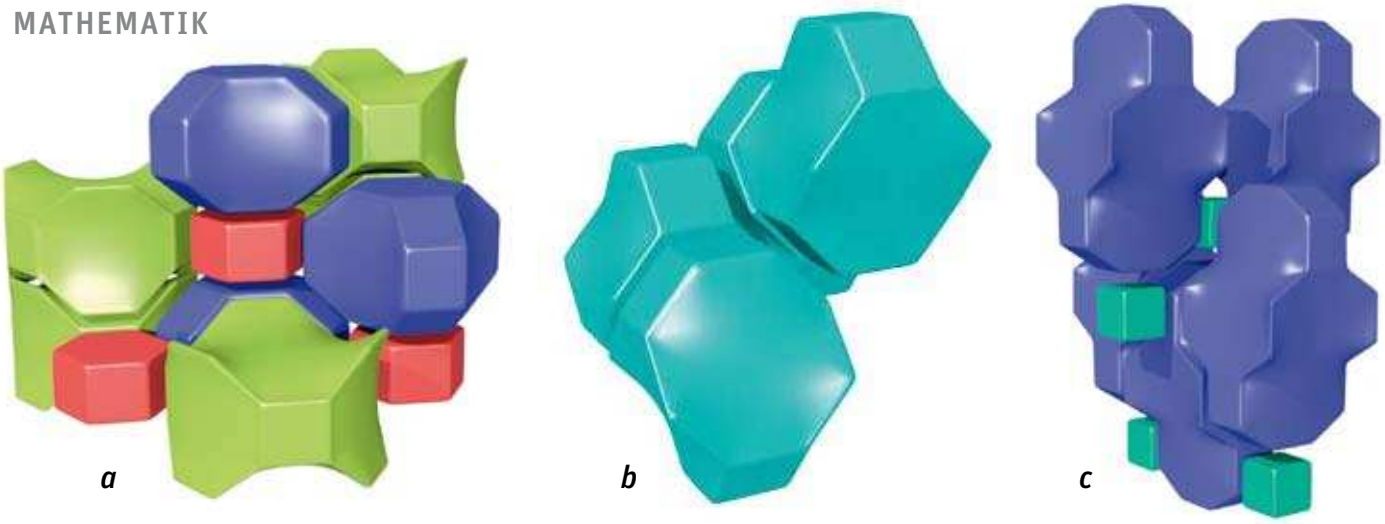
Erschöpfende Durchsuchung

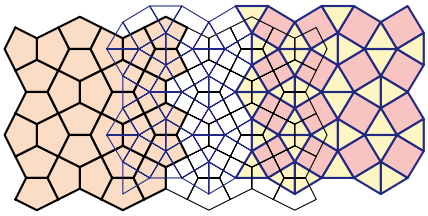
Dieses Verfahren, das in der Praxis wieder mit Hilfe eines Computers durchgeführt wird, erwies sich als ausgesprochen erfolgreich. Von vielen Millionen potenzieller Baupläne, die Daniel Huson und ich im Lauf unserer gemeinsamen Arbeit produzierten, schlüpften nicht einmal ein Dutzend durch das Netz des Computers und mussten »von Hand« weiter untersucht werden.

Für die Lösung des Tetraederproblems hatte unser Programm am Ende einige hundert Baupläne produziert. Genau 46 Baupläne waren gültig und neun davon minimal: Die zugehörigen Pflasterungen lassen sich nicht so deformieren, dass ihre Symmetrie größer wird und somit einen kleineren Bauplan erlaubt. Nur für eine dieser neun Urformen erzwingen Sommervilles Vorgaben – dieser suchte ja nach konvexen Tetraedern, also solchen mit geraden Kanten und ebenen Seitenflächen – nicht schon die maximale Symmetrie. Zwei weitere besitzen identische Steine. Am Ende blieben zwei unendliche Familien und sechs zusätzliche einzelne raumfüllende Tetraeder übrig, exakt diejenigen, die schon Senechal beschrieben hatte. Ihre



Bei Stäben der Länge 7 statt 5 hat jeder Stab in Heinrich Heeschs Pflasterung 14 + 6 statt 10 + 6 Nachbarn. Also ist die eine Pflasterung nicht in die andere deformierbar. Allgemein sind die unendlich vielen Pflasterungen dieser Art zu verschiedenen Kantenlängen wesentlich verschieden voneinander.





Dualisierung einer ebenen Pflasterung: Aus Flächen werden Ecken und umgekehrt; jede Kante wird zu einer neuen Kante, welche die alte schneidet.

Liste war, zumindest was isohedral pflasternde Tetraeder betrifft, vollständig gewesen.

Zu ähnlichen Ergebnissen kam übrigens etwa zur selben Zeit auch eine Gruppe um Emil Molnár von der Technischen Universität Budapest. Molnár und seine Mitarbeiter benutzten anfangs etwas unterschiedliche Baupläne, übernahmen aber später die Methode der Delaney-Dress-Symbole.

Siedende Steine

Huson und ich klassifizierten nach dem oben beschriebenen Schema auch Pflasterungen aus deformierten Würfeln beziehungsweise Oktaedern. Doch so interessant und befriedigend diese Resultate sind – helfen sie uns letztendlich auch beim Verständnis der Kristalle?

Um die platonische mit der modernen Vorstellung eines Atoms zu verknüpfen, denken wir uns Atomkerne in allen Tetraedermittelpunkten einer Pflasterung. Zwei Atome sollen immer dann eine Bindung eingehen, wenn ihre Tetraeder eine Fläche gemeinsam haben. Indem wir für jede Bindung eine Kante einzeichnen, erhalten wir ein räumliches, periodisches Netz.

Aus jeder Fläche unserer Pflasterung entsteht so eine Kante einer neuen Pflasterung. Deren Flächen entstehen aus den Kanten der alten Pflasterung: Man nehme alle (alten) Flächen, die einer alten Kante anliegen. Die aus diesen Flächen entstehenden (neuen) Kanten beranden die neue Fläche, und die Atome sitzen in den Ecken der neuen Pflasterung. Jeder neue Pflasterstein entspricht einer alten Ecke.

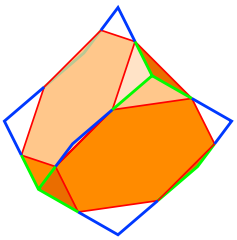
Die neue Pflasterung heißt das Dual der Ausgangspflasterung. Der Prozess des Dualisierens hat eine schöne Eigenschaft: Das Dual des Duals ist, jedenfalls bis auf Äquivalenz, wieder die ursprüngliche Pflasterung.

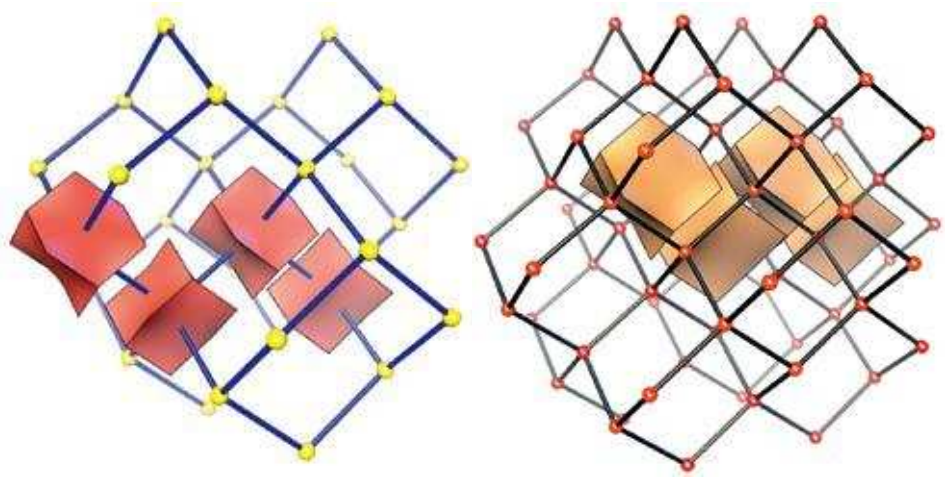
Im Zweidimensionalen kann man auf analoge Weise Duale bilden (kleines Bild links).

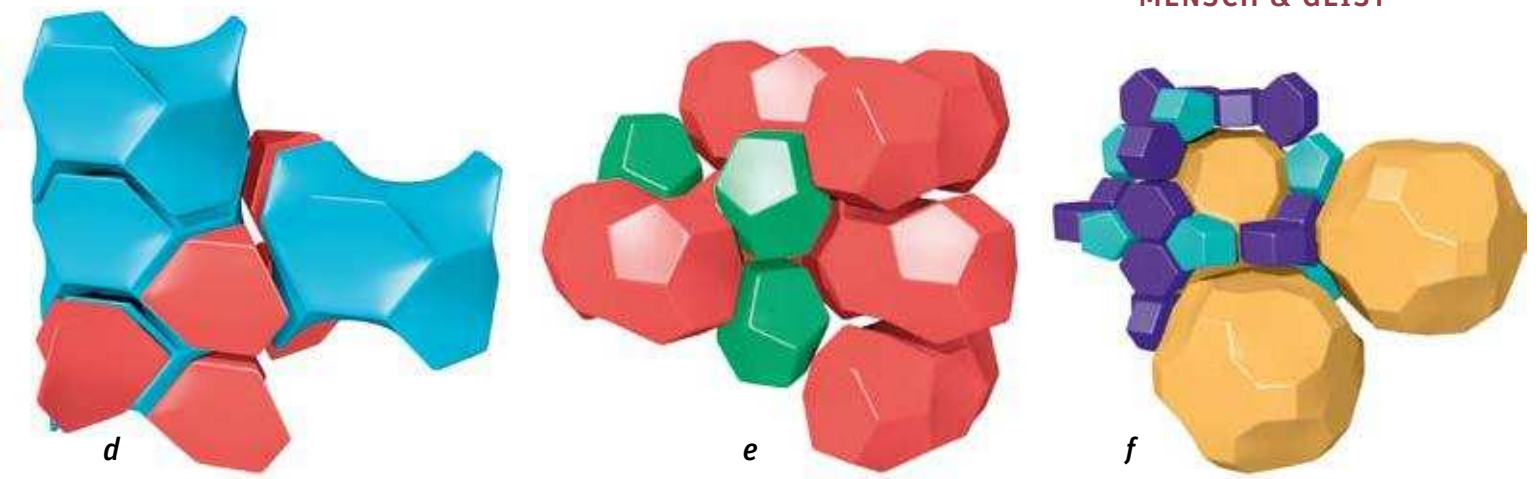
Das Dualisieren einer Tetraederpflasterung führt zu einer Pflasterung, bei der an jeder Ecke vier Pflastersteine, vier Kanten und sechs Flächen zusammenkommen. Von den sechs Flächen gehören jeweis drei zu einem gemeinsamen Pflasterstein und drei zu einer gemeinsamen Kante der Pflasterung. Solche Pflasterungen heißen »einfach«.

Aus einer isohedralen Pflasterung wird durch Dualisieren eine »uninodale«: Zu je zwei Ecken gibt es stets eine Symmetrie, welche die erste auf die zweite transportiert. Die Ecken erben diese Eigenschaft von den Pflastersteinen der ursprünglichen Pflasterung. Aus

Aus der Wigner-Seitz-Zelle des Diamanten (S. 71 rechts oben) entsteht ein Extetraeder: Grüne Kanten bleiben bestehen, rote verschwinden, und blaue kommen neu hinzu. Dabei schieben sich die blauen Spitzen zwischen zwei Pyramidenaufsätze der benachbarten Wigner-Seitz-Zellen. Ein Netz aus Extetraedern (rechts) geht durch Dualisieren in sich selbst über (ganz rechts).







Pflasterungen aus Extetraedern und deren Duale erfassen eine erstaunliche Vielfalt von Kristallstrukturen: zwei weitere bereits synthetisierte uninodale Zeolithe (*a* und *b*) sowie weitere Kandidaten, die eine Gruppe von Chemikern um Jacek Klinowski von der University of Cambridge und Robert Bell von der Royal Institution in London aus Tetraedernetzen (*c* und *d*) und aus Pflasterungen mit zwei (*e*) beziehungsweise drei (*f*) Steinsorten konstruiert hat.

dem Resultat über Tetraederpflasterungen folgt somit, dass es genau neun einfache uninodale Pflasterungen des Raumes mit minimalen Bauplänen – also maximaler Symmetrie – gibt (Bild S. 69). Diese waren bereits bekannt; neu ist die Erkenntnis, dass die Liste der einfachen uninodalen Pflasterungen bereits vollständig war.

Von ihnen kommen zumindest sechs in der Natur vor. Es handelt sich um die Kristallstrukturen einer bestimmten Art von Mineralien, der so genannten Zeolithe (Spektrum der Wissenschaft 9/1989, S. 94).

Zeolithe sind von winzigen Hohlräumen durchsetzt, die zum Beispiel einzelne Wassermoleküle aufnehmen und bei Erhitzen wieder abgeben können. Es sieht dann so aus, als ob der Kristall sieden würde (Zeolith bedeutet »siedender Stein«). Durch diese Eigenschaften werden sie vielfältig verwendet, so beim Raffinieren von Erdöl, als Zusatzstoffe in Waschmitteln oder auch zum Binden von Flüssigkeit. Bis heute sind über hundert verschiedene Zeolithstrukturen bekannt.

Es gibt insgesamt 18 bekannte uninodale Zeolithstrukturen. Kann man die übrigen zwölf, so fragten wir uns, ebenfalls durch Dualisieren von Pflasterungen konstruieren? Wir versuchten es mit leicht abgewandelten Tetraedern, bei denen wir in einigen Kantenmittelpunkten zusätzliche Ecken – gewissermaßen Knicke – einführten.

Die Flächen solcher »exzentrischen Tetraeder«, oder kurz »Extetraeder«, sind nicht mehr eben, was aber kein methodisches Problem darstellt. Um echt neue Pflasterungen zu erhalten, muss man beim Pflastern gelegentlich neue auf alte Ecken legen. Hat man alle Kanten mit Knicken versehen und legt jede neue Ecke auf eine alte, so bekommt man eine Pflasterung, deren Netz aus Ecken und Kanten gerade der Diamantstruktur entspricht. In diesem speziellen Fall erhalten wir auch durch das Dualisieren nichts Neues. Die soeben gefundene Diamantpflasterung ist selbstdual (Bild links unten).

Im allgemeinen Fall aber gibt es viele Möglichkeiten, Extetraeder zusammenzusetzen. Und da sie wieder jeweils vier Seitenflächen besitzen, konnten wir hoffen, durch Dualisieren aus ihnen weitere Modelle für Zeolithstrukturen zu gewinnen.

Unsere Idee war überraschend erfolgreich. Tatsächlich erhält man auf diese Weise nicht nur Pflasterungen für alle noch fehlenden uninodalen Zeolithe, sondern auch für Zeolithe, die es (noch) gar nicht gibt (Bild oben). Inzwischen scheint es uns nicht unwahrscheinlich, dass man sogar für den Großteil aller überhaupt bekannten Kristallstrukturen mit ganz ähnlichen Verfahren Pflasterungen konstruieren kann.

Ob Pflasterungen außer zur Visualisierung und Beschreibung noch weitere Vorteile bei der Untersuchung von Kristallen haben, bleibt abzuwarten. Bei Zeolithen und verwandten Materialien geben sie häufig die Struktur der Hohlräume sehr gut wieder.

Pflasterungen könnten auch Hilfestellung bei der Entwicklung neuer Synthesewege leisten. Hierbei bringt man in eine Lösung Fremdmoleküle mit der Form der gewünschten Hohlräume ein, um so den Kristall um diese »Templates« (»Schablonen«) herumwachsen zu lassen. ◁

Olaf Delgado-Friedrichs hat an der Universität Bielefeld Mathematik studiert und dort 1994 über räumliche Pflasterungen promoviert. Seitdem gilt sein Hauptinteresse Anwendungen der Mathematik, insbesondere der Geometrie, in den Naturwissenschaften. Nach Forschungsaufenthalten an der Arizona State University habilitierte er sich 2002 in Bielefeld und arbeitet heute nach Stationen in Tübingen und Tempe (Arizona) als Software- und Webentwickler am Supercomputer-Zentrum der Australian National University in Canberra.

Delgado-Friedrichs, O. et al.: Systematic Enumeration of Crystalline Networks. In: Nature 400, S. 644 – 647, 1999.

Grünbaum, B., Shephard, G.: Tilings and Patterns. Freeman, New York 1987.

Heesch, H.: Reguläres Parkettierungsproblem. Westdeutscher Verlag, Opladen 1968.

O'Keeffe, M. et al.: Frameworks for Extended Solids: Geometrical Design Principles. In: Journal of Solid State Chemistry 152(1), S. 3 – 20, 2000.

Senechal, M.: Which Tetrahedra Fill Space? In: Mathematics Magazine 54(5), S. 227 – 243, 1981.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/960480.

Die Zukunft der Digitalfotografie

Ist das bewegliche Motiv verschwommen oder ein Bildteil unscharf, lassen sich Fotos bislang kaum retten. Neue Techniken schaffen Abhilfe: Forscher erproben, wie Fotografen immer mehr Eigenschaften ihrer Bilder auch noch nachträglich verändern können.

Von Brian Hayes

Digitalkameras lösten revolutionäre Veränderungen in der Fotografie aus – und tun es immer noch. Elektronische Chips beendeten eine über 150 Jahre währende Ära, in der die wundervolle und auch ein wenig seltsame Fotochemie der Silberhalogenidkristalle eine zentrale Rolle spielte. Die Kameras selbst haben sich im Lauf dieser Umwälzung erstaunlicherweise kaum verändert. Wo einst der analoge Film vorbeigezogen wurde, besitzen digitale Kameras nun einen Siliziumsensor. Neu ist auch der Bildschirm auf der Kamerarückseite. Objektiv, Verschluss und die übrigen Teile des optischen Systems spielen jedoch genau dieselbe Rolle wie immer, ebenso die meisten Bedienelemente. Die Bilder, die die Kamera aufnimmt, sehen ebenfalls wie früher aus – zumindest solange man sie nicht mit der Lupe betrachtet.

Doch der Fotografie, die Kunst und Wissenschaft zugleich ist, stehen weitere Veränderungen ins Haus. In Laboren wird mit neuartigen Kameras experimentiert, die ein Bild nicht einfach nur digitalisieren, sondern umfangreiche Berechnungen mit den Bilddaten durchführen. Einige dieser Versuche zielen darauf ab, den Fotografen bei der Anwendung bestehender Techniken zu unterstützen oder diese Techniken wirkungsvoller zu gestalten. Dazu gehört die Erhöhung des Dynamikumfangs (damit Details sowohl in hellen wie in dunklen Bildpartien gut wiedergegeben werden) oder die Erhöhung der Schärfentiefe (um nahe ebenso wie ferne Objekte gleichermaßen scharf abzubilden). Andere Neuerungen geben den Fotografen die Möglichkeit, Phänomene wie die Bewegungsunschärfe besser zu kontrollieren. Die ausgefallensten Projekte der Entwickler aber stellen die Idee originalgetreuer Wiedergabe der Wirklichkeit durch die Fotografie als solche in Frage. Zukünftige Kameras erlauben dem Fotografen vielleicht, eine Szene aufzunehmen und erst im Nachhinein Beleuchtung oder Blickwinkel zu verändern. Andere werden möglicherweise in der Lage sein, Bilder im Stil von Aquarellen oder Tuschezeichnungen zu generieren.

Schon heute finden in einer Digitalkamera weit mehr Berechnungen statt, als mancher vermuten dürfte. Der Bildsensor ist eine rechteckige Matrix winziger lichtempfindlicher Halbleiterelemente (»Pixel«). Das fertige Bild ist ebenfalls eine rechteckige Anordnung von farbigen Pixeln. Man könnte nun annehmen, es gebe eine simple 1 : 1-Beziehung zwischen Sensor- und Bildpixeln: Jeder Sensorpixel misst Farbe und Intensität des einfallenden Lichts und überträgt die Werte auf den korrespondierenden Bildpunkt.

Tatsächlich funktioniert das Verfahren anders. In den meisten Kameras bedeckt ein Mosaik aus roten, grünen und blauen Farbfiltern den Sensor, so dass nur Licht bestimmter Wellenlängenbereiche die Pixel überhaupt erreicht. Im endgültigen Bild jedoch enthält jedes Bildpixel alle drei Farbkomponenten. Errechnet werden dessen Farben mittels De-Mosaicing, einem Verfahren, das Farbwerte aus benachbarten Sensorpixeln auf verschiedene Weise interpoliert. Ein einziges Bildpixel kann darum Informationen aus einem Dutzend Sensorpixeln enthalten.

Oft wendet der Kameraprozessor auch einen Algorithmus zum Schärfen der Bilder an, der Kanten und sprunghafte Übergänge be-

Die ausgefallensten Ideen aber stellen die Idee der originalgetreuen Wiedergabe der Wirklichkeit in Frage

MIT FRDL. GEN. VON RAMESH RASKAR, MIT MEDIA LAB

Fasst man den Begriff »Fotografie« ziemlich weit, sind beide Abbildungen Fotografien. Das linke Bild schoss eine konventionelle Digitalkamera. Das rechte Foto stammt von einer modifizierten Kamera, die mit Hilfe eines mathematischen Algorithmus Kanten erkennt und betont, um so die räumliche Struktur des Bilds herauszustellen. Anschließend veränderte die Kamera das Bild zusätzlich, nämlich so, dass es wie ein Gemälde wirkt.

tont. Außerdem manipuliert er möglicherweise den Kontrast und die Farbbalance des Bilds, bevor er die Daten schließlich komprimiert, um sie Platz sparend abzuspeichern. Angesichts all dieser internen Berechnungen erscheint eine Digitalkamera längst nicht mehr als passives Werkzeug zur Aufnahme von Bildern – Sätze wie »Diese Kamera *macht* gute Bilder« sind mittlerweile immer wörtlicher zu nehmen. Der Moment der Aufnahme, in dem der Sensor ein optisches Muster registriert, ist gerade einmal der Beginn des komplexen Prozesses, der schließlich zum Bild führt.

Zaubereien mit dem Lichtfeld

Bislang werden die algorithmischen Kunststücke allerdings hauptsächlich genutzt, um digitale Bilder so gut wie möglich ihren nasschemischen Vorbildern anzugleichen. Aber sobald die Kamera mit einem leistungsfähigen Bildverarbeitungsprozessor ausgerüstet ist, kann das Gerät auch ehrgeizigere oder ausgefallenere Projekte in Angriff nehmen. Bilder solcher Computerkameras könnten Aspekte der Wirklichkeit einfangen, die normalen Kameras schlicht entgehen.

Wo immer wir gehen und stehen, umgibt uns ein Feld aus Licht: An jedem Punkt des Raums treffen Lichtstrahlen aus allen Richtungen ein. Ziel vieler der neuen Techniken ist es, aus diesem Lichtfeld zusätzliche Informationen zu gewinnen. Ein Gedankenexperiment illustriert das Prinzip: Wir bauen den Bildsensor einer Digitalkamera aus und platzieren ihn vor einem Flachbildschirm. Der Einfachkeit halber nehmen wir an, beide seien monochromatisch und quadratisch mit einer Seitenlänge von 1000 Pixeln, besitzen also jeweils eine Million Bildpunkte. Die Pixel des Bildschirms emittieren Licht, dessen jeweilige Intensität abhängig von dem auf dem Schirm dargestellten Muster ist. Jedes Sensorpixel wiederum empfängt Licht von allen Pixeln des Bildschirms. Eine Million Sender mal eine Million Empfänger ergeben 10^{12} Interaktionen. Was für ein Bild »sieht« nun der Sensor in diesem Szenario? Eine langweilige Fläche konstanter Helligkeit: Zwar empfängt er enorm viel Information, die aber ist über alle Pixel des Sensors verschmiert und lässt sich nicht ohne Weiteres rekonstruieren.

Nun positioniert man eine Lochblende zwischen Sensor und Bildschirm. Ist das Loch klein genug, beleuchtet jedes Bildschirmpixel exakt ein Sensorpixel und erzeugt so ein scharfes Bild. Doch die Eindeutigkeit hat ihren Preis, denn nun kommt nur noch ein Millionstel der verfügbaren Lichtmenge beim Sensor an: Statt 10^{12} finden in diesem Fall nur noch 10^{6} Wechselwirkungen statt.

Eine Linse ist weniger verschwenderisch: Sie fokussiert den gesamten Lichtkegel, der von einem Pixel ausgeht, auf den korrespondierenden Sensorpixel. Doch wenn sie ihre Arbeit gut macht, erfüllt auch sie die strenge Ein-Bildpixel-ein-Sensorpixel-Beziehung. Außerdem ist das Abbild eines Objekts nur dann scharf, wenn es sich in der genau richtigen Entfernung von der Linse befindet. Gehen die Strahlen von einem Punkt jenseits dieses Ortes aus – ob näher an der Linse oder weiter weg –, werden sie nicht in einem Punkt gebündelt, sondern erzeugen eine Lichtscheibe, und das Bild wird unscharf.

Das Fotografieren mit konventionellen Kameras zwingt den Fotografen zu Kompromissen – egal, ob ihm ein analoges oder digitales Gerät zur Verfügung steht. Ist die Blende weit

Seit jeher muss ein Fotograf auf sein Motiv scharfstellen, bevor er den Auslöser drückt. Mit Hilfe der Lichtfeldfotografie lassen sich Brennebene und Schärfentiefe jedoch auch nachträglich einstellen. Alle Bilder dieser Serie stammen von einer einzigen Aufnahme einer Spezialkamera. Von Bild zu Bild wurde anschließend der Fokus schrittweise nach hinten verschoben. Rechts außen ist ein Kompositbild zu sehen, das alle Personen gleichzeitig scharf darstellt.

offen, tritt also viel Licht hindurch, geht Schärfentiefe verloren: Man kann nicht das vordere und das hintere Ende des Pferds gleichzeitig scharf aufs Bild bekommen. Bleibt der Verschluss länger offen und sammelt deshalb viel Licht ein, kann die Blende stärker geschlossen und so die Schärfentiefe erhöht werden. Dann aber darf sich das Pferd während der Aufnahme nicht bewegen, damit keine Unschärfe entsteht.

Kurze Belichtungszeiten bei möglichst weit geschlossener Blende können beide Probleme entschärfen. Dann aber treffen nur noch sehr wenige Photonen auf den Sensor, und das Bild geht unter Umständen im Rauschen unter. Dank Computerhilfe lassen sich einige dieser Einschränkungen umgehen. Beschafft man sich zusätzliche Informationen über das Lichtfeld, lassen sich insbesondere Brennebene und Schärfentiefe nachträglich korrigieren. Andere Techniken reduzieren auch die Bewegungsunschärfe.

Der Sensor einer Digitalkamera registriert die Intensität des Lichts, das auf jedes Pixel fällt, bringt aber nichts darüber in Erfahrung, aus welcher Richtung das Licht kommt. Um das komplette Lichtfeld aufzuzeichnen, müsste er sowohl Intensität als auch Herkunft jedes einfallenden Lichtstrahls erfassen. Jedes Pixel enthielte dann nicht nur Information über die Intensität des Lichts, sondern – in Form einer komplexen Datenstruktur – über die Intensität abhängig von der jeweiligen Einfallsrichtung.

Weil dies bislang kein Sensor leisten konnte, arbeiten Wissenschaftler mit zusätzlicher Hardware. Die zu Grunde liegenden Prinzipien erforschten Edward H. Adelson und John Y. A. Yang vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) schon in den frühen 1990er Jahren. Einer der Ansätze, um das Lichtfeld aufzuzeichnen, ist eine gitterförmige Anordnung aus mehreren Kameras. Jede von ihnen ist mit eigenem Objektiv und Bildsensor ausgestattet und nimmt ein Bild derselben Szene auf, allerdings aus je leicht unterschiedlichem Blickwinkel – entsprechend verschiebt sich das Abbild der Szene auf dem Sensor. Indem man die Informationen aus allen Sensoren wieder zusammenführt (dazu später mehr), lässt sich das Lichtfeld rekonstruieren.

Ein Motiv, viele Perspektiven

Experimente mit solchen Kameraanordnungen begannen in den 1990er Jahren. Bennett Wilburn und seine Kollegen zum Beispiel, Forscher an der kalifornischen Stanford University, installierten 96 Videokameras neben- und übereinander und leiteten den immensen Datenstrom an vier Computer weiter. Das Ergebnis bezeichneten sie als *synthetic aperture photography*, also Fotografie mit synthetischer Blende. Eine verwandte Technik wird auch bei Radioteleskopen und Radarantennen genutzt.

Für Familienausflüge ist Wilburns Gerätepark natürlich weniger geeignet. Ren Ng und eine weitere Forschergruppe an der Stanford University (Marc Levoy, Mathieu Brédif, Gene Duval, Mark Horowitz und Pat Hanrahan) verwirklichten daher ein ähnliches Konzept im Miniformat. Statt viele Kameras zusammenzuschalten, installierten sie eine Anordnung von Mikrolinsen direkt vor dem Sensor einer einzelnen Digitalkamera, die aber ansonsten konventionell mit Objektiv, Blende und Verschluss ausgestattet war. Jede Mikrolinse fokussiert das Bild, das auf sie fällt, auf eine andere Region des Sensorchips. Auf diese Weise sieht der Sensor statt eines großen Bilds viele kleine, und zwar aus geringfügig verschiedenen Blickwinkeln.

Anders als zweidimensionale Fotos besitzen Lichtfelder mindestens vier Dimensionen. Jedes Feldelement wird durch zwei Koordinaten beschrieben, die die Elementposition in der Bildebene festhalten, und zwei weitere Koordinaten, die die Richtung des einfallenden Lichts zum Beispiel durch den entsprechenden Höhen- und Azimutwinkel angeben. Obwohl der Sensor der Mikrolinsenkamera ein flacher, zweidimensionaler Chip ist, lassen

Dieselbe Kamera (vergleiche oben) bietet auch die Option, den Blickwinkel zu verändern, unter dem das Objekt erscheint. Alle drei Bilder stammen aus einer einzigen Aufnahme. Dennoch scheint sich die Kamera von Bild zu Bild seitlich und (Bild rechts) sogar in Richtung des Objekts zu bewegen.

FOTOS DIESER SEITE: REN NG, REFOCUS IMAGING

sich aus den darauf entstehenden »Unterbildern« die beiden Extradimensionen der Richtung ermitteln. Das Foto (links unten) der Wachsmalstifte illustriert dies. Aufgenommen wurde es aus sehr kurzer Entfernung, so dass die einzelnen Unterbilder erhebliche Unterschiede im Blickwinkel aufweisen. Die Veränderung der Perspektive kommt dabei nicht einfach durch geometrische Transformationen wie Verschiebung oder Skalierung zu Stande, wie sie sich auch auf ein einzelnes Bild anwenden ließen. Stattdessen enthalten die Bilder tatsächlich unterschiedliche Informationen, zum Beispiel sind in einigen Bildern manche Bildregionen verdeckt und in anderen nicht.

Die Verschiebung des Blickwinkels ist eine der leichteren Übungen für die Lichtfeldkamera. Weniger offensichtlich ist ihre Fähigkeit, den Fokus und die Schärfentiefe nachträglich zu verbessern. Liegen Objekte außerhalb der Brennebene, wird das Licht nicht auf ein Sensorpixel gebündelt, sondern über mehrere benachbarte Pixel verstreut, und bedeckt dann eine Fläche, die als Zerstreuungskreis bekannt ist. Das Ausmaß dieses Zerfließens hängt von der Entfernung des Objekts gemessen an der (fokusabhängigen) optimalen Entfernung ab. Ist die tatsächliche Entfernung des Objekts bekannt, lässt sich der Durchmesser des Zerstreuungskreises berechnen und die Unschärfe rechnerisch korrigieren: Im Prinzip zieht man – für jedes Pixel einzeln – einfach das Streulicht von den Helligkeitswerten der Nachbarpixel ab und schlägt die Summe dem korrekten Sensorpixel zu.

Um dieses theoretische Prinzip in der Praxis umzusetzen, müssen wir die Tiefe jedes Motivpunkts ermitteln, also seine Entfernung von der Kamera. Aus konventionellen Fotos lässt sich die Tiefeninformation nur sehr schwer gewinnen, die Lichtfeldkamera jedoch verschlüsselt sie in den Bilddaten. Der Schlüssel ist die Parallaxe: die scheinbare Verschiebung des Objekts bei Veränderung des Blickwinkels. Generell gilt, dass jedes Objekt eine geringfügig unterschiedliche Gruppe von Pixeln in jedem der Unterbilder belegt und dass Ausmaß und Richtung dieser Verschiebungen von der Tiefe des Objekts im Raum abhängen. Die Tiefeninformation ähnelt der in stereoskopischen Fotografien, basiert aber nicht nur auf zwei, sondern auf vielen Bildern.

Eine vierdimensionale Aufnahme kann jedoch mehr als nur einen unscharfen Schnappschuss retten. Mit geeigneter Software lässt sich der Brennpunkt nach vorne oder hinten verschieben oder ein Kompositbild erzeugen, in dem alle Tiefenebenen zugleich scharfgestellt sind. Das befreit den Fotografen von der Notwendigkeit, das gewünschte Motiv bereits bei der Aufnahme scharfzustellen, und reiht die Einstellung des Fokus unter andere nachträglich veränderbare Größen wie Farbe und Kontrast ein.

Anat Levin, Rob Fergus, Frédo Durand und William T. Freeman vom MIT beschrieben kürzlich eine weitere Technik, die Brennebene und Schärfentiefe kontrollieren hilft. Sie basiert auf dem Prinzip der kodierten Blende *(coded aperture)* und beruht ebenfalls auf einer leicht modifizierten normalen Kamera. Statt der Mikrolinsen vor dem Sensor platzieren die Forscher in der Blendenöffnung eine Maske oder einen Filter mit einem Muster aus durchsichtigen und undurchsichtigen Bereichen.

Dem Bild einen Stempel aufgedrückt

Die einfachste dieser Masken ist ein Halbkreis, der die Hälfte der Blendenöffnung bedeckt. Ein solcher Schirm, so könnte man denken, verdeckt einfach die Hälfte des Bilds, tatsächlich aber wird die gesamte Sensorfläche von Lichtstrahlen der gesamten aufgenommenen Szene erreicht. Was sich hingegen ändert, ist die Unschärfe von Objekten außerhalb der Brennebene: Sie wird asymmetrisch und erlaubt daher, das Ausmaß der Unschärfe zu bestimmen und sie zu korrigieren. Die für diesen Zweck ideale Maske ist kein einfacher Halbkreis, sondern ein Muster aus transparenten Bereichen verschiedener Form, Orientierung und Größe. Von diesem Muster leitet sich auch der Begriff »kodiert« her, weil es den Bilddaten eine Art Stempel aufdrückt.

Experimente mit kodierten Masken führten auch Ashok Veeraraghavan, Ramesh Raskar und Amit Agrawal vom Mitsubishi Electric Research Laboratory in Massachusetts sowie Ankit Mohan und Jack Tumblin von der Northwestern University in Illinois durch. Sie zeigten, dass die Masken nicht nur in der Blendenöffnung, sondern auch nahe der Sensorebene angebracht werden können. Hier übernehmen sie dieselbe Funktion wie das Mikrolinsenfeld in Ngs Lichtfeldkamera. Sie drücken dem Bild einen Stempel auf, der anschließend die Richtungsinformationen aus dem Lichtfeld entschlüsseln hilft.

Selbst Bewegungsunschärfe lässt sich aus Bildern herausrechnen, dann nämlich, wenn die Muster in einer anderen Dimension kodiert sind: in der Zeit statt im Raum. Raskar, Agrawal und Tumblin konstruierten eine Kamera, mittels derer sich bewegte Objekte auch dann korrekt darstellen lassen, wenn der Verschluss während der Aufnahme längere Zeit geöffnet blieb und das Objekt verschwommene Streifen hinterließ.

Auch Bewegungsunschärfe lässt sich mit Computerhilfe korrigieren. Der flatternde Verschluss bringt dieses Phänomen unter Kontrolle. Er öffnet und schließt sich während der Belichtung in quasizufälligen Intervallen, um Informationen zur Beseitigung der Bewegungsunschärfe zu gewinnen. Das oberste Bild zeigt ein konventionelles Foto einer Spielzeuglokomotive in Ruhe. Darunter ist ein unkorrigiertes Foto der sich bewegenden Lok zu sehen, das mit flatterndem Verschluss aufgenommen wurde. Der blaue Streifen unterhalb dieses Bilds stellt die Sequenz von Intervallen mit geöffnetem beziehungsweise geschlossenem Verschluss dar. Ganz unten: das rekonstruierte Bild

MIT FRDL. GEN. VON RAMESH RASKAR, MIT MEDIA LAB

MIT FRDL. GEN. VON RAMESH RASKAR, MIT MEDIA LAB

»Nichtfotorealistische Kameras« helfen, mit skizzenhaften Abbildungen (rechts) entscheidende Bildteile und deren räumliche Struktur hervorzuheben. Hierzu betonen sie die Kanten des Originalbilds (links) und glätten Flächen mit digitalen Algorithmen.

Erstaunliches leisten Aufnahmen mit synthetischer Blende. Weil sie erlauben, die Brennebene nachträglich zu verschieben, können sie etwa Büsche im Unscharfen »verschwinden« lassen und dahinterliegende Objekte zum Vorschein bringen.

STANFORD COMPUTER GRAPHICS LAB, VAIBHAV VAISH, BENNETT WILBURN, NEEL JOSHI & MARC LEVOY (PROCEEDINGS OF THE IEEE CONFERENCE ON COMPUTER VISIONS AND PATTERN RECOGNITION 2004)

Bewegungsunschärfe sollte sich eigentlich recht einfach korrigieren lassen: Man muss einfach die Pixel entlang der Trajektorie einsammeln und den ruhenden Hintergrund vom bewegten Objekt separieren. Manchmal funktioniert diese Methode tatsächlich recht gut. Kommt es aber zu Zweifelsfällen bei der Unterscheidung, ist das Resultat unbefriedigend. Auch wenn das Objekt auf der Aufnahme sehr stark gestreckt ist, lassen sich möglicherweise nur wenige Anhaltspunkte finden, um seine wahre Größe oder Form zu bestimmen. Dann muss man raten – und wenn man falsch rät, kommt es zu unschönen Artefakten.

Ein wohlbekannter Trick zur Vermeidung von Bewegungsunschärfe ist die stroboskopische Beleuchtung, bei der kurze, schnell aufeinander folgende Blitze die Bewegung einfrieren und Information über die jeweilige Position des bewegten Objekts liefern. Doch nicht jeder besitzt ein Stroboskop oder mag es in bestimmten Situationen einsetzen. Raskar und seine Kollegen haben die Technik daher einfach »umgekehrt«: Statt stroboskopischer Beleuchtung verwenden sie einen stroboskopischen Verschluss, der während der Aufnahme mehrmals nacheinander schnell geöffnet und geschlossen wird. Dabei müssen die Forscher natürlich auf die insgesamt korrekte Belichtungszeit achten. Diese Technik eines »flatternden Verschlusses« verwandelt ein lang gezogenes Motiv in eine Abfolge weniger verschmierter Bilder. Die Grenzen der einzelnen Schmierbilder bieten dabei wertvolle Anhaltspunkte für die anschließende Rekonstruktion des unverschmierten Bilds.

Weiter verfeinern lässt sich diese Methode, indem man die Blende in unregelmäßigen Abständen öffnet und schließt. Ein fester Rhythmus erzeugt Marker in festen Abständen, also mit nur einer räumlichen Frequenz. Das nützlichste Muster, um die Geschwindigkeit des Objekts zu ermitteln, ist jedoch eines, das die Anzahl unterschiedlicher räumlicher Frequenzen maximiert. Auch hier wird den Bilddaten eine eindeutige Signatur aufgeprägt.

Der flatternde Verschluss könnte auch die Bildstabilisatoren ersetzen, mit denen manche Kameras mittlerweile ausgestattet sind. Sie korrigieren eine ganz bestimmte Form der Bewegungsunschärfe, nämlich diejenige, die der Fotograf beim Halten der Kamera selbst verursacht.

Rechnerunterstützte Fotografie ist derzeit ein heißes Thema in der Computergrafik, so dass die Entwicklungen vielfältiger sind, als mir der Platz zu berichten erlaubt. Auf zwei weitere Ansätze sei aber noch verwiesen. Ein Projekt stammt von Raskar und Kollegen (Kar-Han Tan von Mitsubishi, Rogerio Feris und Matthew Turk von der University of California in Santa Barbara und Jingyi Yu vom MIT). Sie experimentieren mit »nichtfotorealistischer Fotografie«, mit Kamerabildern also, die Zeichnungen, Diagrammen oder Gemälden ähneln (Bilder oben).

Selbst die Kamera wird virtuell

Für manche Zwecke sind handgezeichnete Darstellungen aussagekräftiger als Fotos. Sie anzufertigen erfordert allerdings viel Arbeit, von Talent ganz zu schweigen. Raskars Kamera versucht diesen Vorgang zu automatisieren, indem sie diejenigen Bildcharakteristika aufspürt und betont, die einer Szene ihre grundlegende dreidimensionale Struktur verleihen, vor allem die Kanten von Gegenständen. Kanten automatisch zu erkennen ist nicht immer ganz einfach: Der Algorithmus kann Änderungen in Farbe und Textur mit physischen Rändern verwechseln, Tapetenmuster können dem Computer ein Loch in der Wand vorgaukeln.

Um diese visuellen Mehrdeutigkeiten zu vermeiden, nutzen Raskar und Kollegen den Umstand, dass nur tatsächliche Ränder Schatten werfen. Sie statteten eine Kamera mit vier um die Linse herum angeordneten Blitzlichtern aus, die sie einzeln nacheinander auslösen. So erzeugen sie vier Bilder mit jeweils anders fallenden Schatten und dadurch gut identifizierbaren Konturen. Die Bildsoftware betont anschließend die Ränder und glättet Bildflächen, um ablenkende Details zu beseitigen. Das Ergebnis erinnert an ein Aquarell oder manchmal auch an eine Tuschezeichnung.

Eine andere unkonventionelle Idee, die duale Fotografie, stammt von Hendrik P.A. Lensch, derzeit am Max-Planck-Institut für Informatik in Saarbrücken, zusammen mit Stephen R. Marschner von der Cornell University im US-Bundesstaat New York und Pradeep Sen, Billy Chen, Gaurav Garg, Mark Horowitz und Marc Levoy von Stanford. Dabei wird eine Kamera auf eine Szene scharfgestellt, die von einer einzelnen Lichtquelle

irgendwo im Raum beleuchtet wird. Das entstehende Foto wird die Szene natürlich aus Sicht der Kamera zeigen. Erstaunlicherweise kann man durch einige Rechenvorgänge aber auch ein Bild erzeugen, in dem Kamera und Lichtquelle den Platz tauschen. Mit anderen Worten: Die Kamera erzeugt ein Bild, das von einem Platz aufgenommen scheint, an dem sich überhaupt keine Kamera befand.

Das klingt ein wenig nach Zauberei oder um die Ecke gucken, aber das Prinzip ist sehr einfach. Reflexion ist symmetrisch. Der Weg, den die Lichtstrahlen von der Lichtquelle zur Kamera nehmen, bleibt gleicht, wenn man Kamera und Lichtquelle vertauscht – sie würden nur ihre Richtung verändern. Weiß die Kamera also, woher ein Lichtstrahl kommt, kann sie berechnen, wo der in umgekehrter Richtung laufende Strahl in eine hypothetische Kamera am Ort der Lichtquelle fiele.

Doch dieser Trick hat Grenzen. Eine Kamera auf dem Boden beispielsweise wird niemals eine Landschaft so abbilden können, wie sie aus der Luft aussieht. Denn die Forscher benötigen für ihr Verfahren eine ganz spezielle Lichtquelle, deren Pixel sich einzeln ansteuern lassen; in diesem Fall nutzen sie einen zweckentfremdeten digitalen Projektor, wie er für Vorträge und Präsentationen verwendet wird. Der einfachste Algorithmus schaltet alle Pixel des Geräts der Reihe nach ein, so dass sich die Helligkeit jedes einzelnen Punkts messen lässt. Hier sind wir also wieder bei unserem Gedankenexperiment angekommen, in dem eine Million Bildpixel eine Million Sensorpixel beleuchten. Aber diesmal haben wir das Experiment nicht mehr im Kopf durchgeführt, sondern mit Hard- und Software.

Fotos sind künftig das Ergebnis einer Berechnung

Einige dieser Innovationen werden das Labor wahrscheinlich nie verlassen, andere nur von Hollywood-Regisseuren eingesetzt werden. Aber eine ganze Reihe der neuen Ideen erscheinen ausgesprochen praktisch. Der flatternde Verschluss beispielsweise lässt sich ohne allzu großen Aufwand in bestehende Kameras integrieren. Auch an der kommerziellen Anwendung von Mikrolinsenkameras arbeitet ihr Entwickler Ng bereits.

Natürlich frage ich mich, wie sich unser Verständnis von Fotografie verändern wird, wenn (und falls) sich derartige Techniken etablieren. Dass Fotos nicht lügen, war zwar schon immer unwahr. Und doch umgibt die Fotografie – trotz einer jahrzehntelangen Fälschungsgeschichte, die vom manuellen Retuschieren per Airbrush-Technik bis zum digitalen Betrug mit Hilfe von Bildbearbeitungssoftware reicht – der Nimbus der dokumentierenden Kunst, anders als die Malerei und andere visuelle Darstellungsformen, die ganz offensichtlich subjektiven Charakter besitzen. Zumindest aber nehmen die meisten Menschen an, dass ein Foto tatsächlich ein Foto von etwas ist, sich also auf ein wirkliches Ding in der wirklichen Welt bezieht.

Doch schon jetzt hat die digitale Bildverarbeitung unsere Wahrnehmung der Fotografie bereits verändert. In Zeiten der Silbersalzemulsionen konnte man ein Foto noch als zusammenhängendes Bild mit einer kontinuierlichen Abfolge von Tönen und Schattierungen auffassen. Ein digitales Bild ist aber eine Matrix aus einer endlichen Anzahl von Pixeln, von denen jedes einzelne eine Farbe aus einer diskreten Palette wiedergibt. Daraus folgt unter anderem, dass die Anzahl möglicher digitaler Bilder begrenzt ist und vielleicht bei etwa 10^{10^8} liegt. Eine echte Einschränkung ist dies natürlich nicht, aber dennoch: Allein der Gedanke, Bilder seien eine begrenzte Ressource, kann unsere Haltung ihnen gegenüber verändern.

Weitere Veränderungen bringt es mit sich, dass wir allmählich anerkennen (müssen), dass ein Foto das Ergebnis einer Berechnung, ein Produkt von Algorithmen ist. Von unserer ursprünglichen naiven Vorstellung, es zeige ein Muster eingefrorener, im Flug gefangener Photonen, entfernen wir uns immer weiter. Und das ist noch nicht alles. Auch Neurowissenschaftler erklären uns, dass unsere Fähigkeit zu sehen eher im Gehirn lokalisiert ist als im Auge. Selbst mit unseren eigenen Augen »sehen« wir also kein Abbild der wirklichen Welt, wie es auf die Netzhaut fällt, sondern nur eine von unserem Gehirn durch die komplexe Verarbeitung von Mustern generierte Repräsentation der Welt.

Nun entwickeln sich, so scheint es, auch Kameras in diese Richtung. Nicht Photonen und Elektronen, nicht einmal Pixel können heute noch als Schlüsselelemente der Fotografie gelten. Was einem Bild schließlich seine Bedeutung verleiht, sind Strukturen höherer Ordnung. ◁

Brian Hayes ist US-amerikanischer Autor und Kolumnist der Zeitschrift »American Scientist« mit einem Schwerpunkt auf Fragen der Informatik und Mathematik. Regelmäßig schreibt er auch in seinem Weblog http://bit-player.org.

Bimber, O.: Computational Photography – The Next Big Step. In: Computer 39, S. 28 – 29, 2006.

Levin, A. et al.: Image and Depth from a Conventional Camera with a Coded Aperture. In: Proceedings of the 2007 SIGGRAPH Conference, Artikel Nr. 70.

Moreno-Noguer, F. et al.: Active Refocusing of Images and Videos. In: Proceedings of the 2007 SIGGRAPH conference, Artikel Nr. 67.

Ng, R. et al.: Light Field Photography with a Hand-Held Plenoptic Camera. In: Stanford University Computer Science Tech Report 2005-02.

Ramesh, R. et al.: Coded Exposure Photography: Motion Deblurring Using Fluttered Shutter. In: ACM Transactions on Graphics 25, S. 795 – 804, 2006.

Sen, P. et al.: Dual Photography. In: Proceedings of the 2005 SIGGRAPH conference, S. 745 – 755.

Wilburn, B. et al.: High Performance Imaging Using Large Camera Arrays. In: Proceedings of the 2005 SIGGRAPH Conference, S. 765 – 776.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/960482.

© American Scientist

BLUE SCREEN

(Fast) Nichts ist unmöglich

Moderne Tricktechnik verleiht Schauspielern Flügel – zumindest auf der Leinwand.

Von Klaus-Dieter Linsmeier und Mark Fischetti

Wenn die besten Leichtathleten der Welt zur Olympiade antreten, führen sie die Möglichkeiten des menschlichen Körpers vor Augen: Stabhochspringer stemmen sich sechs Meter hoch, Sprinter durchmessen in weniger als zehn Sekunden 100 Meter. Doch diese fantastischen Leistungen verblassen angesichts scheinbar müheloser Sprünge in hohe Baumwipfel, wie sie im Kampfkunstdrama »Tiger and Dragon« (2000) zu bewundern waren, oder im Vergleich zu Spidermans rasend schnellen Schwüngen durch die Wolkenkratzerlandschaft Manhattans (2007). Selbst olympische Fechtkunst wirkt wie ein Kinderspiel, denkt man an das Degenduell, das der Sohn von »Indiana Jones« (2008) auf der Kühlerhaube eines durch den Dschungel rasenden Jeeps meistert.

Natürlich: Auch Leinwandhelden unterliegen den Gesetzen der Physik, ihre scheinbar übermenschlichen Fähigkeiten verdanken sie in Wahrheit Spezialeffekten. Die häufigste Technik dabei ist das Blue-Screen-Verfahren: Schauspieler agieren vor einer blauen Leinwand und werden nachträglich in eine separat gefilmte oder computergenerierte Szenerie hineinmontiert. Ende der 1930er Jahre entwickelt, ermöglichte der Blue Screen beispielsweise dem »Dieb von Bagdad« (1940), auf einem fliegenden Pferd zu reiten.

Die Wurzeln des Blue Screen reichen freilich noch weiter zurück. Er zählt zu den so genannten Matte-Verfahren, bei denen ein Schauspieler wie mit einem Passepartout auf dem Zelluloid freigestellt wird, um ihn in eine andere Umgebung zu versetzen. Ob »King Kong« (1933) durch den Dschungel bricht, der »Blade Runner« (1982) auf der Jagd nach entflohenen Androiden in einer futuristischen Stadtlandschaft über dem Abgrund hängt oder ein »Erdbeben« (1974) Los Angeles zerstört – was immer sich nicht mit vernünftigem Aufwand im Studio nachbauen ließ, wurde seit den Anfängen des Kinos von hoch spezialisierten Künstlern auf Glas gemalt. Aufgabe der Trickspezialisten war es dann, Fiktives und Reales so zu verschmelzen, dass die echten Kulissen genau dort aufhören, wo das Bild der Matte beginnt.

Wenn es aber gar keine Realkulisse mehr gibt, wenn »Superman« (1978) über New York fliegen soll, muss er Bild für Bild mit der Matte kombiniert werden. Der Trickspezialist Frank Williams ließ sich schon 1918 ein Verfahren für eine Wandermaske (Travelling Matte) patentieren. Seine Schauspieler agierten zunächst vor einer schwarzen Wand. Dann kopierte er die Aufnahme so, dass an Stelle des Menschen nur ein Schattenriss auf dem Film blieb. Anschließend maskierte Williams damit die Aufnahmen des gemalten Hintergrunds – die entsprechenden Bereiche im Bild blieben ausgespart, der Schauspieler konnten hineinmontiert werden.

Mit dem Aufkommen des Farbfilms wurde die Methode zur Blue-Screen-Technik weiterentwickelt, bei der die Darsteller vor einem blauen Hintergrund spielen. Mittels Filter werden von dieser Realaufnahme Kopien in den drei Farben Rot, Grün und Blau hergestellt. Das blaue Trennbild kopiert der Trickspezialist auf einen Schwarz-Weiß-Film, die Akteure sind nun Bild für Bild auf einem sonst schwarzen Film »ausgestanzt«. Hier erweist sich der Grund für die Farbwahl: Blau kommt in den Hauttönen kaum vor, es entstehen also keine unerwünschten Fehlstellen.

Fiktion und Wirklichkeit

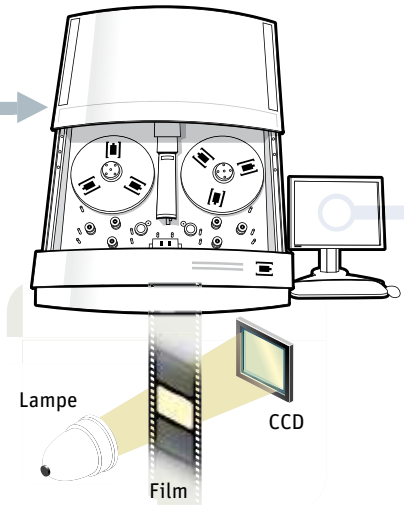
Von diesem Trennbild werden im nächsten Schritt zwei Masken erstellt. In der Positivmaske ist der Hintergrund schwarz, damit lassen sich Schauspieler in der Realszene vom blauen Hintergrund lösen. Umgekehrt erscheinen sie in einer Negativmaske schwarz, um Platz im Hintergrundfilm zu schaffen. Im Optischen Printer werden beide Filme dann gemeinsam auf einen neuen projiziert.

Diese Montage der verschiedenen Bildteile ist keine leichte Aufgabe. Nicht nur dürfen Trennlinien zwischen den Teilbildern nicht

FILM

Eine Schauspielerin springt vor einem blauen Schirm in die Höhe und wird dabei gefilmt.

Die Szenerie wird aufgenommen.



Scanner digitalisieren die Filme Bild für Bild.

IM COMPUTER

Bildbearbeitungssoftware ersetzt blaue Pixel durch weiße.

Wussten Sie schon?

▶ **Bei sehr schnellen Bewegungen** der Schauspieler ist die passgenaue Montage des Realfilms mit dem maskierten Hintergrund eine Herausforderung. Tennisbälle oder helle Flecken helfen: Auf dem blauen oder grünen Schirm angebracht, ergeben sie ein Koordinatensystem, müssen aber nach getaner Arbeit wieder aus dem Film entfernt werden.

▶ **Auch im Fernsehen** verrichtet der Blue Screen (hier Blue Box genannt) seinen Dienst, etwa bei der Wettervorhersage. Da es nun weniger auf Realismus ankommt als bei einer Filmsequenz, genügt es, die blauen Farbanteile per Software aus einem Videobild herauszurechnen. Freilich darf der Wettermann dann keine blaue Krawatte tragen – sie würde als Loch sichtbar.

▶ **Ein vereinfachter Blue-Screen-Prozess** steht inzwischen auch für daheim zur Verfügung: Videokonsolen blenden den mit einer Kamera aufgenommenen Spieler in eine virtuelle Umgebung ein, in der er zum Beispiel Tennis spielt oder eine E-Gitarre nach Hendrix-Art bearbeitet.

▶ **Bis die Digitaltechnik Anfang der 1990er** einen kostengünstigen Blue-Screen-Prozess ermöglichte, war die so genannte Frontprojektion eine ernst zu nehmende Konkurrenz: Ein Bild des Hintergrunds wurde auf den Schauspieler und eine Scotchlite-Leinwand projiziert. Weil das Bild sehr lichtschwach war und der Akteur entsprechend ausgeleuchtet wurde, war es nur auf dem hochreflektierenden Material zu sehen. Zu den mit dieser Technik realisierten Highlights gehörten beispielsweise Szenen wie Sean Connerys Duell auf der lebensfeindlichen Oberfläche des Mondes Io (»Outland«, 1981) oder Harrison Fords rettender Sprung vom Dach eines Gefangenentransporters, auf den ein Zug zurast (»Auf der Flucht«, 1993).

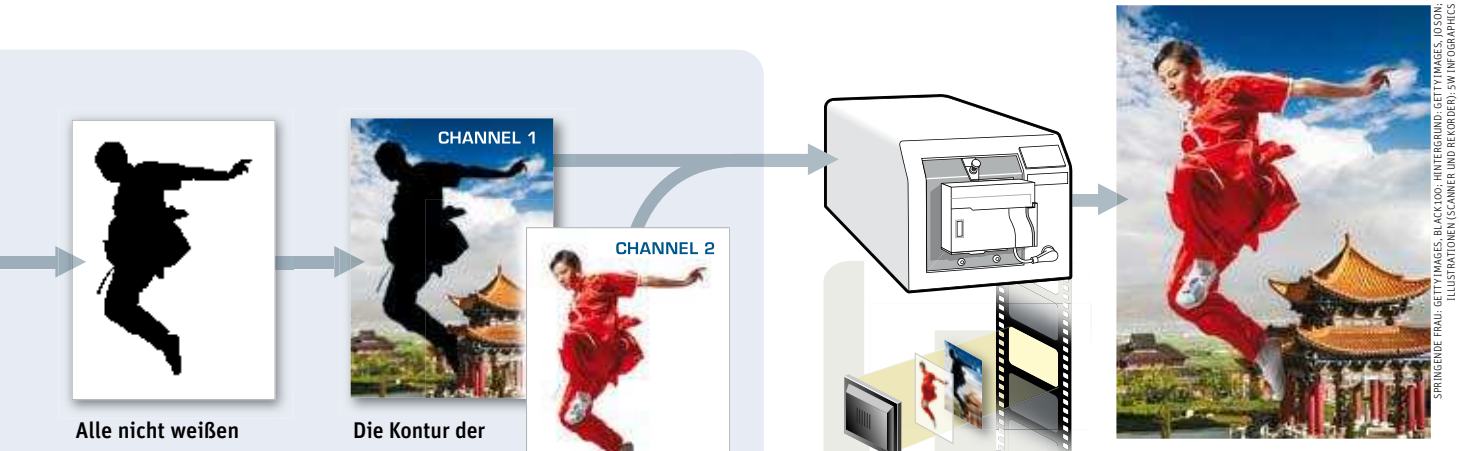
sichtbar sein. Wenn sich mehrere Objekte vor dem Blue Screen bewegen, müssen auch die räumlichen und zeitlichen Abläufe exakt koordiniert werden. Als der »Krieg der Sterne« 1977 eskalierte, entstand das Motion-Control-Verfahren: Damit der rasende Flug eines Raumjägers über die zerklüftete Oberfläche des Todessterns realistisch wirkte, fuhren Kameras computergesteuert auf präzisen Bahnen um die vor einer blauen Leinwand montierten Raumschiffmodelle herum und entlang der Miniaturraumstation.

Computer avancierten in den 1990er Jahren zum Universalwerkzeug der Trickspezialisten. Zwar erfolgen Realaufnahmen auch heute noch meist auf Zelluloid, sie werden aber mit Scannern digitalisiert. Diese zerlegen jedes Filmbild in ein Raster aus Bildpunkten (Pixel) und jeden davon in die Farben Rot, Grün und Blau. Das Herstellen der Blue-Screen-Masken vereinfacht sich dadurch beträchtlich – man muss nur den Blauanteil auf null setzen. Auch andere Farben lassen sich nun für das Matte-Verfahren verwenden, beispielsweise fällt die Wahl inzwischen meistens auf Grün, da es einen helleren Gesamteindruck ergibt.

Regisseuren stehen damit viele Möglichkeiten zur Verfügung, Aufnahmen zu manipulieren. Dabei geht es oft gar nicht um spektakuläre Spezialeffekte. So im ZDF-Zweiteiler »Die Gustloff« (2007): Betrunken tanzen Marine-Helferinnen im luxuriösen Bordschwimmbad, tatsächlich hatten die Studios in Babelsberg nur das Becken nachgebaut, der Rest der Kulisse wurde im Maßstab 1 : 5 modelliert und das Ganze im Green-Screen-Verfahren zusammengeführt.

Stellt sich die Frage: Wer versichert dem Fernsehzuschauer, dass er bei der Übertragung der Olympiade reale Hochleistung sieht? Christian Kassung, Kulturwissenschaftler der Humboldt-Universität zu Berlin, glaubt: »Realität und Fiktion werden im Film nicht mehr unterscheidbar sein, wenn erst einmal alles computergeneriert ist und eben nicht nur die Spezialeffekte.« Noch allerdings wäre der Aufwand enorm. Denn Schatten, Farben und Konturen müssen Pixel für Pixel nachgebessert werden, um Artefakte wie bläuliche Umrisse zu korrigieren. Regisseure wissen um die Grenzen der Technik und lenken durch die Kameraführung den Blick des Zuschauers von kritischen Bildbereichen fort. Das Ziel ist klar: eine möglichst perfekte Illusion. Gutes Kino eben.

Klaus-Dieter Linsmeier ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«, **Mark Fischetti** ist Redakteur bei »Scientific American«.



Alle nicht weißen Bildpunkte werden auf Schwarz gesetzt.

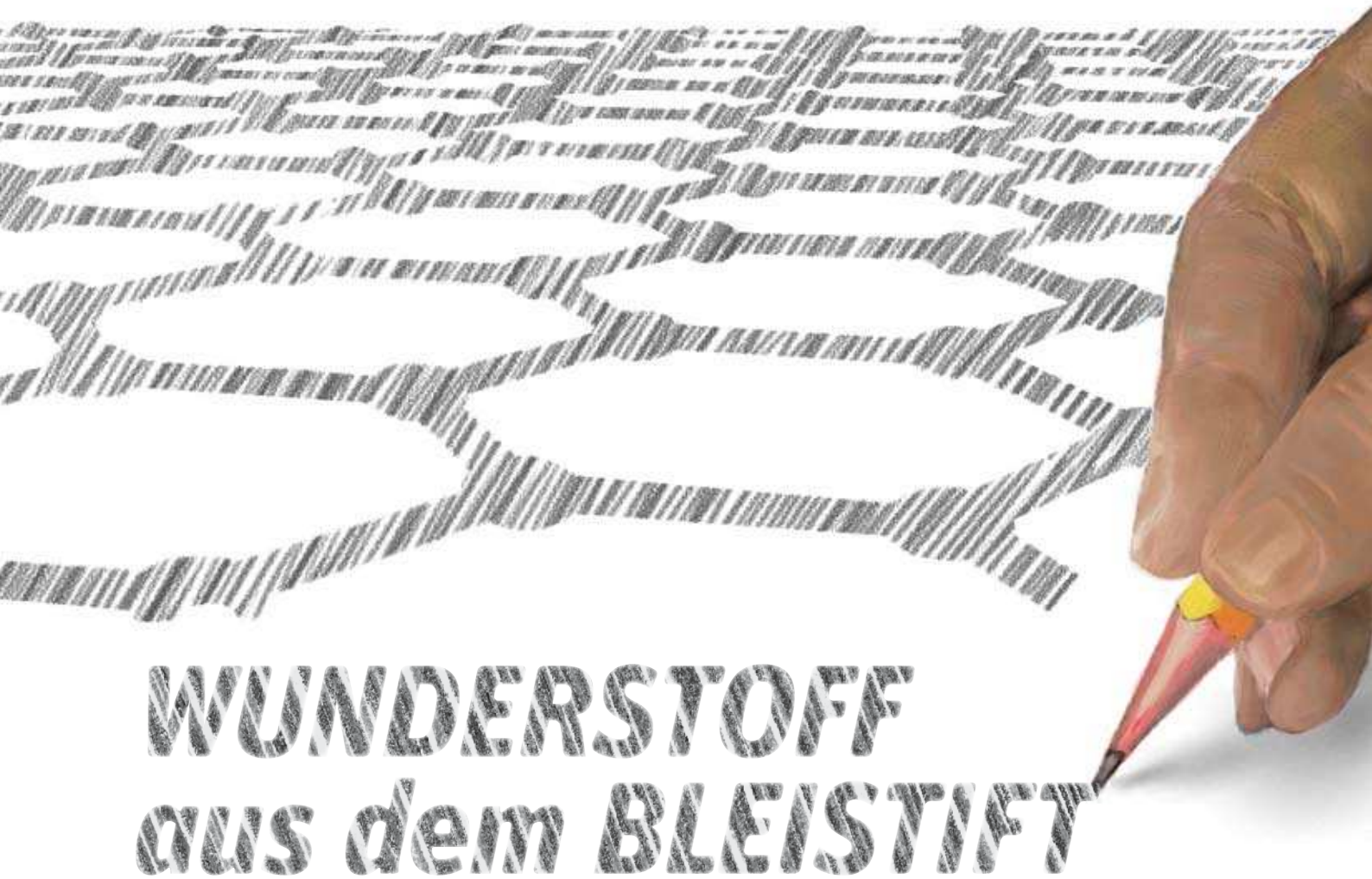
Die Kontur der Schauspielerin maskiert das Hintergrundbild, das Resultat wird in einer Datei abgelegt: Kanal 1.

Das Bild der freigestellten Darstellerin kommt in Kanal 2.

Ein Rekorder kombiniert beide Kanäle und projiziert sie auf einen neuen Film.

Dieser Vorgang wird Bild für Bild wiederholt.

SPRINGENDE FRAU: GETTY IMAGES, BLACK100; HINTERGRUND: GETTY IMAGES, JO SON; ILLUSTRATIONEN (SCANNER UND REKORDER): SW INFOGRAPHICS



WUNDERSTOFF aus dem BLEISTIFT

Graphen, eine kürzlich entdeckte Form von Kohlenstoff, verspricht nicht nur interessante praktische Anwendungen, sondern bietet auch neuartige grundlegende Physik.

Von Andre K. Geim und Philip Kim

Wenn Sie einen simplen Bleistift betrachten, werden Sie kaum glauben, dass er einmal ganz oben auf der Liste der neuesten Technikprodukte stand. In England unterlagen die heute alltäglichen Schreibgeräte wegen der strategisch-militärischen Bedeutung des enthaltenen Graphits sogar einem Exportverbot. Doch auch derzeit steht der Bleistift wieder an vorderster Front des technischen Fortschritts; denn jeder damit gezogene Strich enthält kleine Mengen eines Materials, das zum Aufregendsten zählt, was es heute in der Nanotechnologie gibt: Graphen – mit Betonung auf der zweiten Silbe.

Die Bezeichnung kommt von Graphit – dem Stoff, aus dem die Bleistiftmine besteht. Dabei handelt es sich um eine Kohlenstoff-Modifikation, die aus übereinandergestapelten ebenen Schichten aufgebaut ist. Seit diese Struktur zu Anfang des 20. Jahrhunderts aufgeklärt wurde, haben Physiker und Werkstoffwissenschaftler immer wieder versucht, den Graphit in solche einzelnen Schichten aufzuspalten; denn ein Material mit einer derart einfachen und eleganten Geometrie versprach interessante Eigenschaften. Die Kohlenstoffatome sind darin in Form sich wiederholender Sechsecke angeordnet, wodurch ein ebenes Gitter entsteht, das so genanntem Hasendraht ähnelt. Die Schichtdicke beträgt nur genau ein Kohlenstoffatom.

Jahrelang schlugen alle Versuche zur Herstellung von Graphen jedoch fehl. Die beliebteste Methode war damals, Moleküle als Keile zwischen die Schichten zu schieben und diese dadurch voneinander zu trennen – Chemiker sprechen von Interkalation. Obwohl bei diesem Vorgehen hin und wieder bestimmt auch Graphen-Schichten anfielen, wurden sie nie als solche erkannt. Letztlich entstand ein Brei aus graphitischem Material, der kaum von nassem Ruß zu unterscheiden war. So schwand allmählich das Interesse an der Methode.

Später versuchten Forscher die Trennung auf direkterem Weg. Durch Reiben oder Kratzen von Graphitkristallen an anderen Oberflächen zerspanten sie diese in immer dünnere Scheiben. Eine solche »mikromechanische Spaltung« ist zwar etwas grobschlächtig, funktioniert aber erstaunlich gut. Es gelang damit, Graphitfilme aus weniger als hundert atomaren Schichten herzustellen. Schon 1990 erzeugten Physiker an der RWTH Aachen Exemplare, die so dünn waren, dass man hindurchsehen konnte.

Ein Jahrzehnt später konnte einer von uns (Kim) in Zusammenarbeit mit Yuanbo Zhang, damals Doktorand an der Columbia University in New York, das mikromechanische Spaltungsverfahren wesentlich verfeinern; das Resultat war die Hightech-Variante eines Bleistifts: der »Nanobleistift«. Beim Schreiben damit entstanden Plättchen aus nur 20 bis 50 atomaren Schichten (siehe Kasten auf S. 89). Es handelte sich jedoch immer noch um Graphit, nicht Graphen. Kaum jemand glaubte mehr im Ernst daran, dass monoatomare Schichten tatsächlich herstellbar und stabil wären.

Doch die Pessimisten wurden 2004 eines Besseren belehrt. Zusammen mit Kostya S. Novosedov und seiner Gruppe an der University of Manchester prüfte einer von uns (Geim) eine Vielzahl von Möglichkeiten, noch dünnere Graphitproben zu erzeugen. Damals nutzten die meisten Laboratorien dafür Ruß als Ausgangsstoff, aber Geim und seine Mitarbeiter bewiesen ein glückliches Händchen, als sie stattdessen Graphit zertrümmerten und die Bruchstücke als Ausgangsmaterial verwendeten. Sie nahmen ein Plastikklebeband, bogen es mit der klebenden Seite um einen solchen Splitter herum und zogen es wieder glatt. Dabei wurde der winzige Kristall in zwei Teile gespalten. Je öfter die Forscher den Vorgang wiederholten, desto dünnere Plättchen erhielten sie (siehe Kasten auf S. 91). Als sie schließlich die dünnsten untersuchten, stellten sie erstaunt fest, dass einige atomare Dicke hatten. Und was noch frappierender war: Die Graphenfolien erwiesen sich bei Normaldruck und Raumtemperatur als stabil.

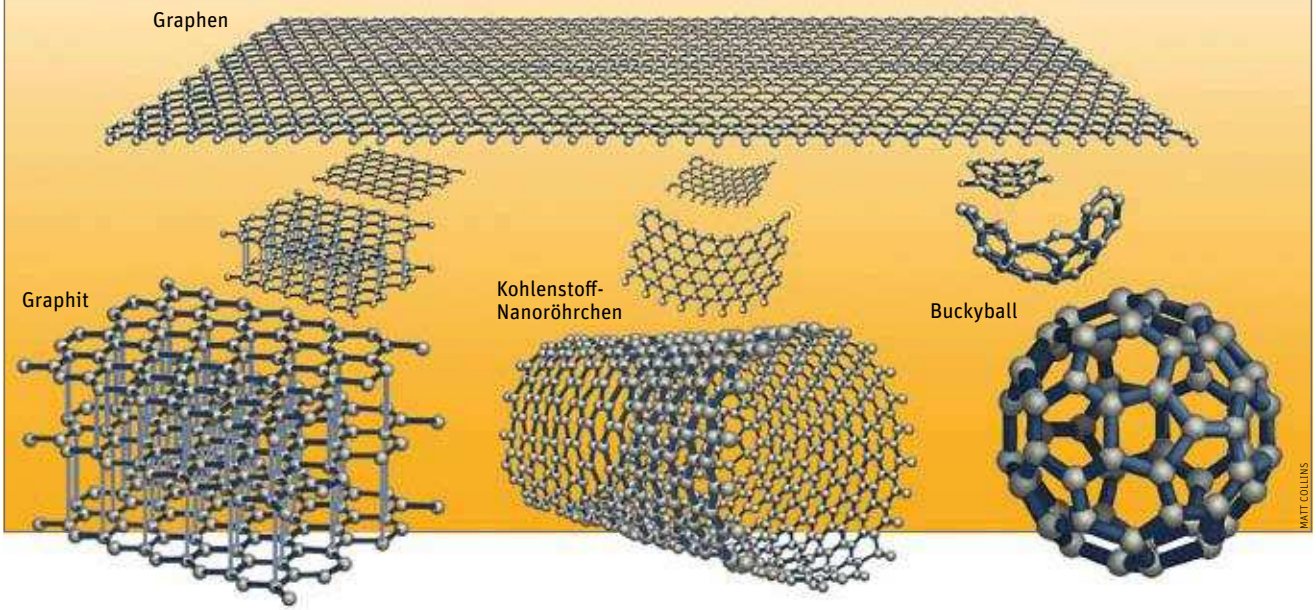
Diese Entdeckung löste eine wahre Forschungslawine aus. Graphen ist nicht nur das dünnste bekannte Material, sondern, wie sich zeigte, auch äußerst fest und steif. Zudem leitet es in reiner Form bei Raumtemperatur Elektronen schneller als jeder andere Stoff. Auf der ganzen Welt untersuchen Ingenieure

In Kürze

- Graphen ist ein nur **eine Atomlage dickes Kohlenstoffblatt**, das Physiker erst kürzlich isolieren konnten. Im Graphit der Bleistiftmine sind viele solche Schichten übereinandergestapelt.
- Reines Graphen leitet elektrischen Strom bei Raumtemperatur besser als jede andere Substanz, weil sich die Elektronen darin fast mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Es kann deshalb zum Nachweis **exotischer Quantenphänomene** dienen, die sonst nur unter extremen Bedingungen beobachtbar wären – etwa in Schwarzen Löchern oder Hochenergie-Beschleunigern.
- Dank seiner ungewöhnlichen Eigenschaften eignet sich Graphen vermutlich auch für eine ganze Palette **innovativer Produkte** wie ultraschnelle Transistoren.

Die Urform aller Graphit-Arten

In Graphen sind Kohlenstoffatome in Form von Hasendraht angeordnet. Es bildet den Grundbaustein einer Reihe von graphitischen Stoffen. Im Graphit selbst sind die Ebenen zu einer Art molekularem Blätterteig übereinandergestapelt, der wegen der schwachen Bindung zwischen den Schichten relativ bröselig ist. Verbiegt man Graphen – teils durch Einbau von Fünfecken – zu runden Gebilden, entstehen so genannte Fullerene. Dazu gehören fußballförmige »Buckyballs«, Zylinder mit Wabenmuster, die als Kohlenstoff-Nanoröhren bekannt sind, und verschiedene Sphäroide, die beide Formen vereinen.



die Substanz deshalb nun auf ihre Eignung für superharte Verbundwerkstoffe, intelligente Displays, ultraschnelle Transistoren und Quantenpunkt-Computer.

Dank gewisser Besonderheiten auf atomarer Ebene ist Graphen aber auch für die Grundlagenforschung hochinteressant. So erlaubt es Vorstöße in den Bereich der relativistischen Quantenmechanik. Die Untersuchung der hochgradig exotischen Phänomene, die dort auftreten, war bisher Astronomen mit ihren millionenschweren Teleskopen und Teilchenphysikern mit ihren Milliarden Euro teuren Beschleunigern vorbehalten. Am Graphen lassen sich Voraussagen der relativistischen Quantenmechanik dagegen auch mit normalen Laborgeräten testen.

Militärisches Geheimnis

Angesichts der weiten Verbreitung des Bleistifts in unseren Tagen erstaunt es, dass er in alten schriftkundigen Kulturen wie der chinesischen oder griechischen keine Rolle gespielt hat. Erst im 16. Jahrhundert entdeckten die Engländer ein großes Vorkommen von reinem Graphit, den sie Plumbago (lateinisch für Bleierz) nannten. Sie erkannten schnell die Eignung des Materials zum Schreiben und entwickelten daraus unverzüglich ein handliches Gerät als Ersatz für Gänsekiel und Tinte. In europäischen Gelehrtenkreisen machte der Bleistift bald Furore.

Dass Plumbago kein Blei, sondern Kohlenstoff ist, fand erst 1779 der schwedische Chemiker Carl Scheele heraus. Ein Jahrzehnt später schlug der deutsche Geologe Abraham Gottlob Werner deshalb vor, die Substanz nach dem griechischen Wort für »schreiben« besser Graphit zu nennen. Inzwischen hatten die Munitionshersteller eine weitere Verwendung des bröseligen Materials gefunden: Es erwies sich als ideales Futter für die Gussformen von Kanonenkugeln – was zum streng gehüteten militärischen Geheimnis wurde. Während der Napoleonischen Kriege verfügte die englische Krone deshalb auch eine Ausfuhrsperre für Bleistifte gegenüber Frankreich.

In den letzten Jahrzehnten hat Graphit etwas von diesem Nimbus als Hochtechnologie-Werkstoff zurückgewonnen; denn Wissenschaftler stießen auf neue, hochinteressante Modifikationen von Kohlenstoff mit hohem Anwendungspotenzial, die in gewöhnlichen graphitischen Materialien vorkommen. Die erste war das berühmte Buckminsterfulleren, auch salopp Buckyball genannt: ein fußballförmiges Molekül, das die US-amerikanischen Chemiker Robert Curl und Richard E. Smalley zusammen mit ihrem englischen Kollegen Harry Kroto 1985 entdeckten. Sechs Jahre später identifizierte der japanische Physiker Sumio Iijima jene zylindrischen Anordnungen von Kohlenstoffatomen mit Wabenstruktur,

Schon gewusst?
Graphit erwies sich nach seiner Entdeckung im 16. Jahrhundert in England nicht nur als ideales Material für Schreibgeräte, sondern auch als perfektes Futter für die Gussformen von Kanonenkugeln. Das verlieh ihm militärische Bedeutung. Während der **Napoleonischen Kriege** Anfang des 19. Jahrhunderts verbot England deshalb die Ausfuhr von Bleistiften nach Frankreich.

die inzwischen als Kohlenstoff-Nanoröhren bekannt sind. Obwohl schon früher darüber berichtet worden war, hatte niemand die Bedeutung des Materials erkannt. Die beiden neuen molekularen Formen erhielten die Sammelbezeichnung Fullerene (zu Ehren des visionären US-Architekten und Ingenieurs Buckminster Fuller, der analog gestaltete geodätische Kuppeln entworfen hatte).

Molekularer Hasendraht

Die grundlegende Anordnung der Atome ist für Graphit, Fullerene und Graphen dieselbe. Jede Struktur beginnt mit sechs Kohlenstoffatomen, die in Form eines regulären Sechsecks fest miteinander verbunden sind; Chemiker sprechen von einem Benzolring.

Auf der nächsthöheren Stufe im Komplexitätsgrad steht Graphen, in dem viele solche Sechsringe zu einem ebenen Wabenmuster, das wie Hasendraht aussieht, aneinandergefügt sind. Die anderen graphitischen Formen beruhen auf dieser Grundstruktur. Bei den Kohlenstoff-Nanoröhren sind die Graphen-Schichten zu Zylindern aufgerollt und bei den Buckyballs wölben sie sich durch zusätzlich eingebaute Fünfecke zu einer Kugel oder einem Ellipsoid. Bei Graphit schließlich sind sie, wie erwähnt, übereinandergestapelt. Dabei halten schwache molekulare Wechselwirkungen – so genannte van der Waals-Kräfte – die einzelnen Schichten zusammen. Wegen dieser lockeren Verbindung zwischen den Graphen-Ebenen genügt beim Schreiben mit einem Bleistift schon der Druck auf das Papier, dass sich Schichtpakete vom Graphit ablösen und als Strich auf der Unterlage zurückbleiben.

Wie rückblickend klar ist, waren die neu entdeckten molekularen Formen von Kohlenstoff schon immer präsent. So kommen Fullerene im Ofenruß vor, wenn auch nur in kleinen Mengen. Ebenso enthält jeder Bleistiftstrich zweifellos winzige Graphen-Stücke, die früher nur niemand bemerkt hat. Seit ihrer Entdeckung jedoch stehen sie im Brennpunkt wissenschaftlicher Forschung.

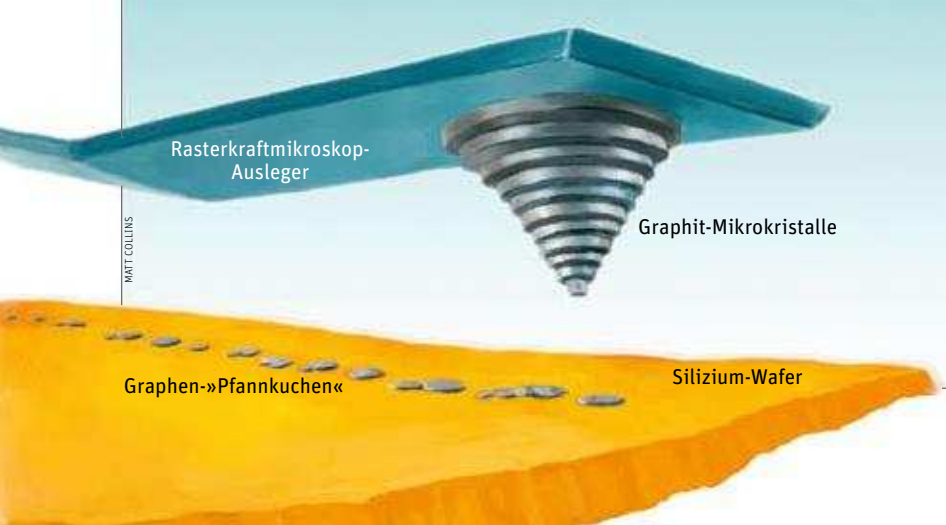
Buckyballs sind vor allem deshalb interessant, weil es sich um eine völlig neue Art von Molekülen handelt. Allerdings könnten sie auch bedeutende praktische Anwendungen haben – etwa bei der Verabreichung von Arzneimitteln. Kohlenstoff-Nanoröhren vereinen gleich eine ganze Reihe von ungewöhnlichen Eigenschaften – chemischen, elektronischen, physikalischen, optischen und thermischen – auf sich, was eine breite Palette potenzieller Einsatzmöglichkeiten eröffnet. So könnten die winzigen Kohlenstoffzylinder als Halbleitermaterial Silizium in Minichips ersetzen oder Fasern liefern, die sich zu sehr leichten und dabei extrem festen Tauen flechten lassen. Obwohl Graphen, die »Mutter« aller graphitischen Formen, erst seit ein paar Jahren Eingang in solche Zukunftsvisionen gefunden hat, scheinen seine Aussichten ebenfalls rosig. Wahrscheinlich wird es sogar noch faszinierendere technologische Anwendungen haben als seine Vettern aus der Kohlenstoff-Familie. Zugleich dürfte es tiefere Einsichten in grundlegende physikalische Prinzipien vermitteln.

Vor allem zwei Eigenschaften machen Graphen zu einem außergewöhnlichen Stoff. So fällt es trotz der relativ groben Herstellungsmethode in bemerkenswert hoher Qualität an. Das liegt neben der Tatsache, dass es aus reinem Kohlenstoff besteht, vor allem an der äußerst regelmäßigen Struktur, in der die Atome angeordnet sind. Bisher ließ sich kein

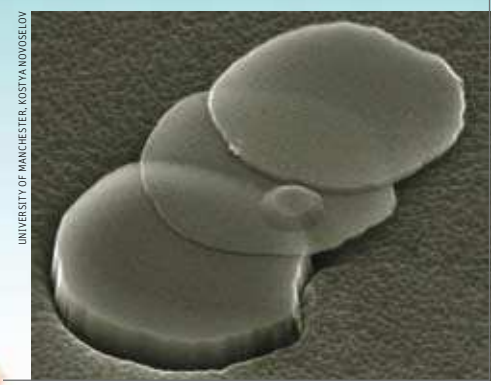
Die Entdeckung von Graphen löste eine wahre Forschungslawine aus

Schreiben mit dem Nanobleistift

Zur Herstellung graphitischer Proben aus möglichst wenigen Schichten – im Idealfall nur einer einzigen – bedurfte es beträchtlicher Anstrengungen. Ein Ansatz bestand darin, einen Graphit-Mikrokristall am Arm eines Rasterkraftmikroskops zu befestigen und mit der Spitze über eine Siliziumscheibe zu schaben (links). Ein solcher Nanobleistift hinterlässt eine Spur von dünnen Graphen-»Pfannkuchen« auf dem Wafer. Das elektronenmikroskopische Bild (rechts) ist 6000-fach vergrößert.



MATT COLLINS



UNIVERSITY OF MANCHESTER, KOSTYA NOVOSELOV

Die Aussagen der Quantenelektrodynamik widersprechen fast immer dem gesunden Menschenverstand

einziger Defekt – etwa eine unbesetzte Position im Gitter oder ein falsch platziertes Teilchen – in einer Graphen-Probe entdecken. Die perfekte Kristallordnung scheint von den starken, aber nicht starren Bindungen zwischen den Atomen herzurühren. Dadurch entsteht ein Stoff, der härter ist als Diamant, dessen blattförmige Moleküle aber biegsam sind und sich ein gutes Stück weit mechanisch verformen lassen, bevor die Spannung so groß wird, dass sich die Atome neu anordnen.

Die Qualität des Kristallgitters ist auch verantwortlich für die erstaunlich hohe elektrische Leitfähigkeit von Graphen. Die Elektronen können fließen, ohne an Gitterfehlstellen oder Fremdatomen anzustoßen und abzuprallen. Sogar Rempeleien von den Kohlenstoffatomen auf regulären Plätzen, die auf Grund ihrer thermischen Energie bei Raumtemperatur nicht still sitzen können, halten sich wegen der großen Stärke der interatomaren Bindungen in Grenzen.

Das zweite außergewöhnliche Merkmal von Graphen ist, dass seine Leitungselektronen nicht nur besser vorankommen, weil sie kaum an Hindernisse stoßen, sondern an sich schon viel schneller unterwegs sind – so, als hätten sie eine weitaus geringere Masse als Elektronen, die sich durch gewöhnliche Metalle oder Halbleiter bewegen. In der Tat sollte man sie besser als elektrische Ladungsträger bezeichnen; denn es sind eigenartige Teilchen in einer bizarren Welt, wo die Gesetze der relativistischen Quantenmechanik herrschen. Ihre Art von Wechselwirkung ist, soweit bekannt, einzigartig für Festkörper. Dank diesem neuartigen Stoff aus der Bleistiftmine spielt die relativistische Quantenmechanik nicht mehr nur im Kosmos und in Teilchenbeschleunigern eine Rolle, sondern hat jetzt auch das Labor erreicht.

Urknall im Flachland

Um sich das merkwürdige Verhalten elektrischer Ladungsträger in Graphen klarzumachen, wollen wir es zunächst mit der Bewegung gewöhnlicher Leitungselektronen in einem Metall vergleichen. Diese gelten zwar als frei, sind es aber nicht wirklich; sie bewegen sich jedenfalls deutlich anders als im Vakuum. Da Elektronen eine negative Ladung tragen, bleibt eine positive Ladung zurück, wenn sie ihren Ursprungsort verlassen und sich durch das Metall bewegen. Bei ihrer

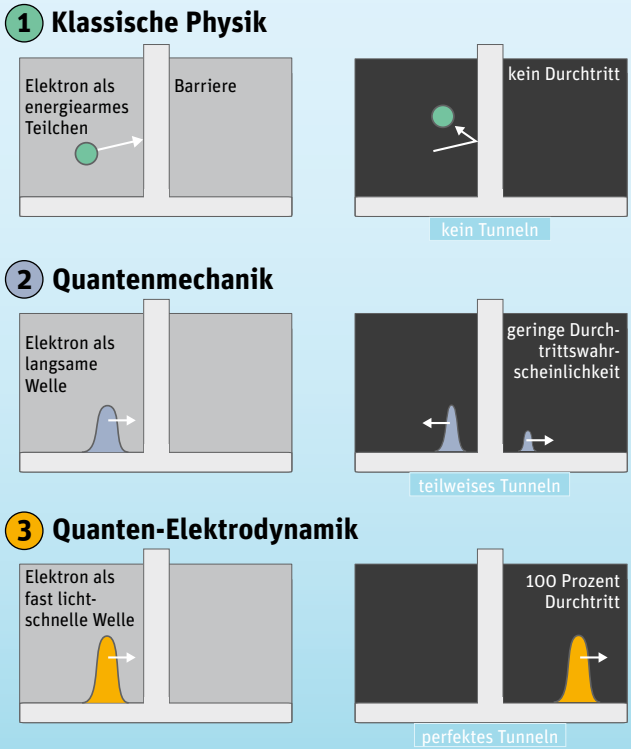
Tunneln ohne Grenzen

Da sich die Leitungselektronen im hochgradig regulären Atomgitter von Graphen praktisch ungehindert bewegen können, erreichen sie so hohe Geschwindigkeiten, dass sich ihr Verhalten nicht mehr mit der normalen Quantenmechanik beschreiben lässt. Vielmehr braucht man deren relativistische Erweiterung. Diese so genannte Quantenelektrodynamik (QED) aber macht einige bizarre Vorhersagen, von denen die Physiker bisher dachten, dass sie nur in Schwarzen Löchern oder Hochenergiebeschleunigern beobachtbar wären. Mit Graphen sollte sich dagegen sogar eine der seltsamsten Folgerungen der QED im Labor testen lassen: das perfekte Quantentunneln.

In der klassischen newtonschen Physik prallt ein Objekt an einer Potenzialbarriere ab, wenn es nicht genug Energie hat, um hinüberzugelangen (1). Das würde auch für das Elektron gelten, sofern es nur Teilcheneigenschaften hätte.

Laut Quantenmechanik kann es sich aber in manchen Situationen wie eine Welle verhalten, die eine gewisse Ausdehnung im Raum hat (2). Dabei ist die Höhe der Wellenlinie an einem bestimmten Punkt ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Teilchen in dem Moment gerade dort befindet. Nähert sich eine solche Welle einer Potenzialbarriere, so durchdringt ihr Seitenast das Hindernis teilweise. Daraus ergibt sich eine gewisse, allerdings geringe Wahrscheinlichkeit, das Teilchen auf der anderen Seite der Barriere zu finden. Das Elektron hat das Hindernis somit gleichsam durchtunnelt.

Wenn sich eine Elektronenwelle im Graphen fast mit Lichtgeschwindigkeit einer Potenzialbarriere nähert, macht die QED eine noch erstaunlichere Vorhersage: Das Elektron durchquert sie mit 100-prozentiger Wahrscheinlichkeit (3). Die hohe elektrische Leitfähigkeit von Graphen scheint das zu bestätigen.



DANIELA NAOMI MOLNAR

Wanderung durch das Kristallgitter treten sie mit dem dortigen elektrostatischen Feld in Wechselwirkung und werden in komplizierter Weise hin- und hergezerrt und -gestoßen. Dadurch benehmen sie sich, als seien sie viel schwerer als gewöhnliche Elektronen; ihre »effektive Masse« ist deutlich höher. Physiker nennen solche Ladungsträger Quasiteilchen.

Während Elektronen im Vakuum fast Lichtgeschwindigkeit erreichen können, bewegen sie sich in Metallen wegen ihrer relativ hohen effektiven Masse sehr viel langsamer. Für ihre theoretische Beschreibung ist das von Vorteil. Bei Partikeln, die sich der Lichtgeschwindigkeit nähern, kommt nämlich Einsteins Relativitätstheorie zum Tragen, die komplizierte Korrekturen erfordert. Weil Quasiteilchen in einem Leiter so langsam sind, lassen sie sich jedoch entweder mit der vertrauten klassischen Physik oder mit normaler, das heißt nichtrelativistischer Quantenmechanik beschreiben.

Auch Elektronen, die durch das Hasendrahtgitter von Graphen schlüpfen, verhalten sich wie eine Art Quasiteilchen. Erstaunlicherweise werden sie durch die Wechselwirkung mit dem elektrostatischen Feld der Kohlenstoffatome jedoch nicht schwerer, sondern leichter. Statt normalen Elektronen gleichen sie deshalb eher dem fast masselosen Neutrino. Zwar ist dieses Elementarteilchen, wie der Name schon sagt, elektrisch neutral, während die Quasiteilchen in Graphen eine negative Ladung tragen. Aber wie Neutrinos unabhängig von ihrer Energie oder ihrem Impuls stets fast lichtschnell unterwegs sind, bewegen sich auch die Elektronen in Graphen mit konstant hohem Tempo. Sie erreichen dabei etwa 0,3 Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Damit sind sie schnell genug, dass relativistische Effekte auftreten können.

Statt mit der normalen Quantenmechanik muss ihr Verhalten deshalb mit der weitaus komplizierteren relativistischen Erweiterung dieser Theorie beschrieben werden: der so genannten Quantenelektrodynamik. In deren Mittelpunkt steht eine probabilistische Gleichung, die nach dem englischen Physiker Paul A. M. Dirac benannt ist, der sie 1928 formulierte. Folglich bezeichnen Physiker in Graphen wandernde Elektronen manchmal als masselose Dirac-Quasiteilchen.

Leider widersprechen die Aussagen der Quantenelektrodynamik fast immer dem gesunden Menschenverstand. Man muss mit scheinbar paradoxen Phänomenen vertraut werden, auch wenn ein gewisses Unbehagen nie ganz verschwindet. Oft beruhen die Paradoxien der Quantenelektrodynamik darauf, dass relativistische Teilchen stets ein bizarres Alter Ego als virtuellen Partner mitschleppen: ihr Antiteilchen. Beim Elektron handelt es sich um das Positron. Es hat exakt dieselbe Masse, aber die entgegengesetzte Ladung.

Gemäß der relativistischen Quantenmechanik kann jederzeit ein Teilchen-Antiteilchen-Paar auftauchen – und zwar direkt aus dem Nichts, nämlich dem Vakuum. Das ergibt sich aus einer der vielen Versionen von Heisenbergs Unbestimmtheitsprinzip. Demnach lässt sich bei einem Ereignis die dafür nötige Energie nur umso ungenauer angeben, je kürzer es ist. Das hat erstaunliche Konsequenzen. Auf extrem kurzen Zeitskalen kann die Energie dadurch nämlich fast beliebig hohe Werte annehmen. Da sie gemäß Einsteins berühmter Gleichung $E = mc^2$ zur Masse äquivalent ist, gilt für diese im Prinzip das Gleiche. So kann durch eine »Energieanleihe« beim Vakuum spontan ein »virtuelles« Elektron-Positron-Paar entstehen – vorausgesetzt

Graphen zum Selbermachen – eine Anleitung

1 Arbeiten Sie unter peinlich sauberen Bedingungen. Jedes Staubteilchen oder Haar macht Ihre Bemühungen zunichte.

2 Besorgen Sie sich einen Silizium-Wafer mit oxidierter Oberfläche, der als Unterlage zum Betrachten des Graphens im Mikroskop dient. Um die Oberfläche zu glätten und gründlich zu reinigen, behandeln Sie diese mit einer Mischung aus Salzsäure und Wasserstoffperoxid.

3 Bringen Sie mit einer Pinzette eine Graphitflocke auf ein 15 Zentimeter langes Klebeband.

4 Falten sie das Band unmittelbar neben der Graphitflocke in einem Winkel von etwa 45 Grad, so dass sie zwischen den klebenden Seiten eingeklemmt ist. Drücken Sie das Band rund um die Flocke behutsam zusammen und öffnen Sie es dann so langsam wieder, dass Sie sehen können, wie sich der Graphit glatt in zwei Teile spaltet.

BEIDE FOTOS: GRAPHENE INDUSTRIES, PETER BLAKE

5 Falten Sie das Band neben einem der Spaltprodukte und wiederholen Sie Schritt 4.

6 Wiederholen Sie Schritt 5 etwa zehnmal. Die Arbeit wird dabei immer kniffliger.

7 Legen Sie Klebeband mit den daran hängenden Spaltprodukten behutsam auf das Silizium, die klebende Seite nach unten. Pressen Sie mit einer Plastikzange sanft noch vorhandene Luft zwischen dem Band und Wafer heraus. Streichen Sie zehn Minuten lang fest, aber vorsichtig über die Probe.

8 Schälen Sie das Band langsam ab, während Sie den Wafer mit der Zange auf die Unterlage drücken. Dieser Schritt sollte 30 bis 60 Sekunden dauern, damit das Graphen auf dem Wafer haften bleibt und Sie es nicht mit dem Band wieder herunterreißen.

9 Legen Sie den Wafer unter ein Mikroskop mit einem 100-fach vergrößernden Objektiv. Dort sehen Sie reichlich Graphittrümmer: große, glänzende Bröckchen in allen möglichen Farben und Formen (oberes Bild, 115-fache Vergrößerung). Mit ein wenig Glück ist aber auch Graphen darunter: transparente, fast farblose kristalline Plättchen (unteres Bild, 200-fache Vergrößerung).

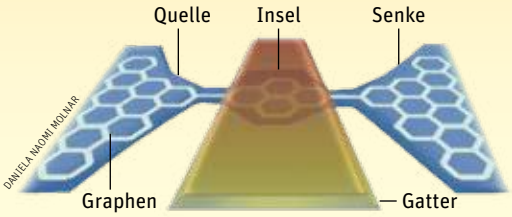
J. R. Minkel

Wozu Graphen gut sein könnte

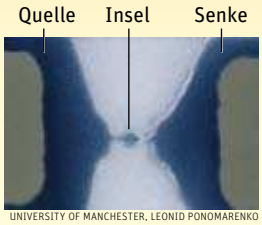
Da Graphen erst seit kurzer Zeit bekannt ist, konnten Ingenieure noch keine fertigen Produkte daraus entwickeln, aber die Liste möglicher Anwendungen ist lang. Hier sind zwei Beispiele aufgeführt.

▼ Einzelelektronen-Transistoren

Aus einem Graphen-Blatt lässt sich leicht ein Einzelelektronen- oder Quantenpunkt-Transistor herstellen. Das Diagramm (unten links) zeigt schematisch, wie zwei Elektroden, eine »Quelle« und eine »Senke«, durch eine nur hundert Nanometer breite »Insel« aus leitendem Material verbunden sind: dem Quantenpunkt. Er ist so klein, dass lediglich ein Elektron darauf Platz hat. Dessen Gegenwart oder Abwesenheit repräsentiert die Binärziffern 1 oder 0. Das Elektron tunnelt aus der Quelle quantenmechanisch zu der Insel, die hier im Zentrum einer elektronenmikroskopischen Aufnahme (unten rechts) in 40 000-facher Vergrößerung zu sehen ist, und dann weiter zur Senke. Gesteuert wird es dabei von der Spannung, die an einer dritten Elektrode, dem so genannten Gatter, angelegt ist. Sie bestimmt darüber, ob das Elektron zur Insel kommen oder sie verlassen kann.



DANIELA NAOMI MOLNAR



UNIVERSITY OF MANCHESTER, LEONID PONOMARENKO

Verbundwerkstoffe ►

Durch Kombination von zwei oder mehr Werkstoffen lassen sich deren positive Eigenschaften oft zusammenführen. Üblicherweise bestehen solche Komposite aus einem Grundmaterial plus einem Verstärker. Man denke an einen Fiberglasbootsrumpf, der aus Plastik mit eingelegten Glasfasern besteht. Forscher prüfen derzeit die physikalischen Eigenschaften eines Komposits, in dem ein Kunststoff mit Materialien verstärkt ist, die sich von Graphen ableiten. Zu diesen zählt vor allem das besonders steife und feste Graphenoxid. Es ist einfacher herzustellen als Graphen selbst und lässt sich zu einem »Papier« verarbeiten (rechts im Vordergrund), das schon bald in Laminaten (rechts im Hintergrund) Verwendung finden könnte.

seine Lebensdauer ist so kurz, dass es die fehlende Energie zurückzahlt, bevor das Defizit nachweisbar wird.

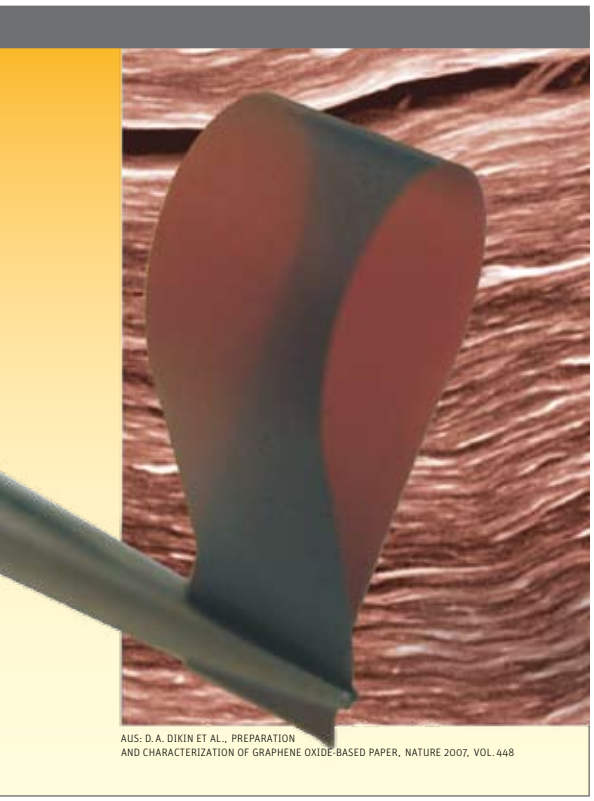
Die seltsame Dynamik des Vakuums in der Quantenelektrodynamik führt zu vielen merkwürdigen Effekten. Dazu zählt insbesondere eine von dem schwedischen Physiker Oskar Klein formulierte Paradoxie. Demnach kann ein relativistisches Objekt unter bestimmten Umständen durch jede Potenzialbarriere gelangen, egal wie breit oder hoch sie ist. Als Beispiel einer solchen Barriere denke man sich einen Berg, der aus einer Ebene aufragt. Ein Lastwagen, der mit Motorkraft hinauffährt, gewinnt potenzielle Energie. Von der Bergspitze kann er dann im Leerlauf auf der anderen Seite hinabrollen. Dabei verwandelt sich seine potenzielle in kinetische Energie.

Ein Laster ohne Benzin schafft es nicht über den Berg. Analog sitzt ein Teilchen in einem Tal zwischen zwei Potenzialbarrieren fest. Allerdings bietet die Quantenmechanik – und zwar schon in ihrer normalen, nichtrelativistischen Form – ein Schlupfloch. Eine zweite Version von Heisenbergs Unbestimmtheitsprinzip besagt nämlich, dass man von einem Objekt unmöglich sowohl den Ort als auch den Impuls genau wissen kann. Letzterer ist bei einem Teilchen, das in einem Energietal hängt, praktisch gleich null und damit sehr präzise bekannt. Folglich herrscht eine hohe Unsicherheit über den Ort. Mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit kann sich das Teilchen demnach auch hinter der Barriere befinden: Es hat sie wie von Geisterhand durchquert. Physiker nennen das den Tunneleffekt.

Im nichtrelativistischen Fall ist die Tunnelwahrscheinlichkeit ziemlich gering und sinkt mit zunehmender Höhe und Breite der Barriere. In der Quantenelektrodynamik dagegen verhält es sich laut Klein völlig anders. Seinen theoretischen Überlegungen zufolge sollten relativistische Teilchen mit einer Wahrscheinlichkeit von 100 Prozent selbst durch sehr hohe, ausgedehnte Hindernisse tunneln. An deren Rand paaren sie sich einfach mit ihrem Antiteilchen-Zwilling, für den die Welt gleichsam auf dem Kopf steht, so dass ihm der Berg als Tal erscheint. Nach der Passage verflüchtigt sich der Ad-hoc-Gefährte wieder ins Nichts, aus dem er mit geborgter Energie kurz aufgetaucht ist, und das Elektron setzt seine Reise fort, als wäre nichts gewesen. Selbst vielen Physikern erscheint derlei Spuk allerdings suspekt.

Die Sache schreit also nach experimenteller Überprüfung. Lange war jedoch unklar, wie ein Test für das kleinsche Paradoxon aussehen könnte oder ob er vielleicht sogar prinzipiell unmöglich ist. Die masselosen diracschen Quasiteilchen in Graphen kommen da nun wie gerufen. Sie machen das kleinsche Paradoxon zum Routine-Effekt mit leicht beobachtbaren Konsequenzen. Man kann im Graphen künstlich Potenzialbarrieren unterschiedlicher Höhe und Breite erzeugen und dann die elektrische Leitfähigkeit messen. Sie

Denkbar wären sogar integrierte Schaltkreise, die sich aus einem einzigen Graphen-Plättchen ausschneiden lassen



AUS: D. A. DIKIN ET AL., PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF GRAPHENE OXIDE-BASED PAPER, NATURE 2007, VOL. 448

sollte bei einer Tunnelwahrscheinlichkeit von 100 Prozent durch die Hindernisse nicht erniedrigt werden. In verschiedenen Laboratorien laufen derzeit entsprechende Untersuchungen. Auch zum Nachweis anderer ungewöhnlicher Konsequenzen der Quantenelektrodynamik bietet sich Graphen an.

Ultraschnelle Transistoren

Aber wie sieht es mit technischen Anwendungen aus? Noch ist es zu früh für eine definitive Antwort. Klar scheint jedoch: Jede Einsatzmöglichkeit für Nanoröhren – eingerolltes Graphen – steht auch der ebenen Form offen. Allerdings muss es dazu gelingen, das Material in industriellem Maßstab zu produzieren. Viele Forschungsgruppen arbeiten an der Entwicklung verbesserter Herstellungsmethoden.

Als Staub lässt sich Graphen bereits in industriellen Mengen erzeugen. Doch ausgedehnte Blätter von dem Material zu gewinnen ist noch immer sehr schwierig, weshalb es sich dabei vermutlich um den teuersten Stoff überhaupt handelt. Ein durch Spaltung mikromechanisch erzeugter Graphen-Minikristall, der dünner als ein Haar ist, kostet derzeit über tausend Dollar. Gruppen in Europa und an mehreren US-Institutionen – darunter das Georgia Institute of Technology in Atlanta, die University of California in Berkeley und die Northwestern University in Evanston (Illinois) – haben Graphen-Filme auf Siliziumkarbidscheiben abgeschieden.

Inzwischen erkunden auch Ingenieure die einzigartigen physikalischen und elektronischen Eigenschaften, die das Material technisch so interessant machen (siehe Kasten links). Mit seinem hohen Verhältnis von Oberfläche zu Volumen sollte es sich etwa für harte Verbundwerkstoffe eignen. Als extrem dünnes Material könnte es auch effizientere Feldemitter ergeben: Geräte, die in Gegenwart von starken elektrischen Feldern aus nadelförmigen Spitzen Elektronen emittieren.

Da sich die Eigenschaften von Graphen mit elektrischen Feldern präzise regulieren lassen, bestehen gute Aussichten, mit dem Werkstoff ultraempfindliche chemische Detektoren sowie bessere supraleitende und Spin-Ventil-Transistoren zu bauen. Ferner könnten dünne Filme aus überlappenden Graphen-Stückchen transparente, elektrisch leitende Beschichtungen für Flüssigkristall-Anzeigen und Solarzellen abgeben. Die Liste ist keineswegs vollständig, und einige Nischenprodukte kommen vielleicht schon in wenigen Jahren auf den Markt.

Ein mögliches Einsatzgebiet verdient besondere Erwähnung: Elektronik auf Graphen-Basis. Wie beschrieben, bewegen sich die Ladungsträger in dem Material mit hoher Geschwindigkeit und verlieren relativ wenig Energie durch Zusammenstöße mit den Atomen im Kristallgitter. Das sollte den Bau so genannter ballistischer Transistoren ermöglichen, die viel schneller schalten als herkömmliche Geräte.

Noch faszinierender ist die Aussicht, mit Graphen die Gültigkeit einer Erfahrungsregel zu verlängern, die der Elektronikpionier Gordon Moore schon vor etwa 40 Jahren formuliert hat. Demnach verdoppelt sich etwa alle 18 Monate die Zahl der Transistoren, die sich auf einer bestimmten Fläche unterbringen lassen. Das unvermeidliche Ende dieser fortschreitenden Miniaturisierung wurde schon oft voreilig prophezeit. Dank seiner bemerkenswerten Stabilität und elektrischen Leitfähigkeit selbst im Nanometerbereich eignet sich Graphen vielleicht für Transistoren, die deutlich weniger als zehn Nanometer messen und womöglich nur aus einem einzelnen Benzolring bestehen. Vorstellbar wären sogar komplette integrierte Schaltkreise, die sich aus einem einzigen Graphen-Plättchen »ausschneiden« lassen.

Das nur ein Atom dicke Material hat also bestimmt eine große Zukunft – als Ausgangspunkt für innovative kommerzielle Produkte ebenso wie als Minilabor zum Nachweis exotischer Quanteneigenschaften. Man kann nur staunen, dass all diese Fülle und Komplexität schon Jahrhunderte lang in jedem Bleistiftstrich verborgen war. ◁

Andre K. Geim ist Mitglied der britischen Royal Society, Physikprofessor an der Universität Manchester (England) und Direktor des Manchester Center for Mesoscience and Nanotechnology. Als gebürtiger Russe hat er am Institut für Festkörperphysik in Tschernogolowka (Russland) promoviert. **Philip Kim** ist Mitglied der American Physics Society und Associate Professor für Physik an der Columbia University in New York. Promoviert hat er an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts).

Castro Neto, A. et al.: Drawing Conclusions From Graphene. In: Physics World 19, S. 33 – 37, November 2006.

Geim, A. K. und Novoselov, K. S.: The Rise of Graphene. In: Nature Materials 6, S. 183 – 191, 2007.

Geim, A. K. und MacDonald, A. H.: Graphene: Exploring Carbon Flatland. In: Physics Today 60, S. 35 – 41, August 2007.

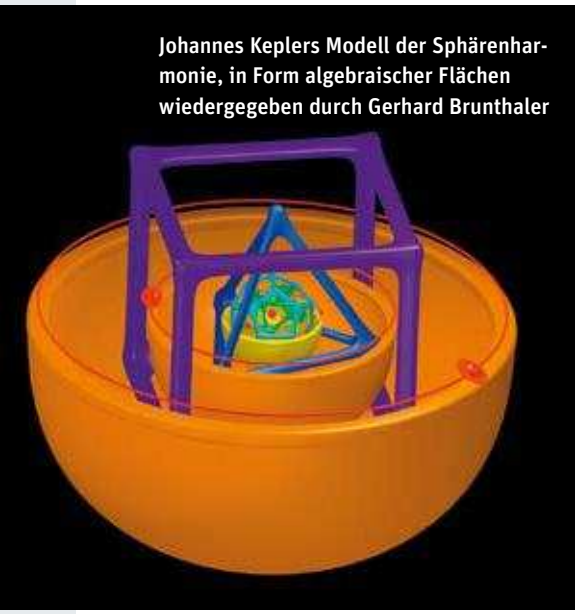
Wilson, M.: Electrons in Atomically Thin Carbon Sheets Behave Like Massless Particles. In: Physics Today 59, S. 21 – 23, Januar 2006.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/960483.

ALGEBRAISCHE FLÄCHEN

Mathematik-Kunst-Wettbewerb: die Ergebnisse

Einige der interessantesten Werke entstanden durch Zweckentfremdung des Programms, das zur Erzeugung algebraischer Flächen bereitgestellt wurde.



Johannes Keplers Modell der Sphärenharmonie, in Form algebraischer Flächen wiedergegeben durch Gerhard Brunthaler

GERHARD BRUNTHALER

Von Christoph Pöppe

Der Mathematik-Kunst-Wettbewerb, zu dem wir in dieser Zeitschrift (4/2008, S. 70) aufgerufen haben, hat unsere Erwartungen weit übertroffen. Bis zum Einsendeschluss am 27. Mai wurden mehr als 800 Arbeiten eingereicht, und auch danach riss der Strom der Einsendungen nicht ab.

Ein regelmäßiger Beobachter konnte nachvollziehen, wie die Künstler an einer Formel herumprobierten, bis das Ergebnis ihren Vorstellungen entsprach oder das Potenzial dieses Ansatzes erschöpft war. Häufig war zu beobachten, dass der eine Ideen eines anderen aufgriff und nach seinem Geschmack modifizierte.

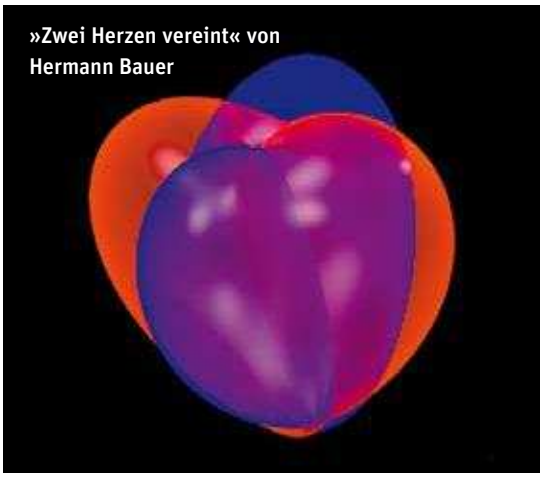
Der großen Gesamtzahl der Teilnehmer zum Trotz wurde das Feld, vor allem gegen Ende, von wenigen Namen dominiert (Kasten S. 96). Algebraische Flächen zu erzeugen ist, in den Worten eines Teilnehmers, »ein Breiten-, aber kein Massensport«. Ein breites Spektrum von Vorgehensweisen war vertreten, von wild-fröhlichem Herumprobieren bis zur tiefen theoretischen Durchdringung mit dem Ziel, eine vorgegebene Gestalt zu produzieren.

Das Runde muss eckig werden

Auch wenn die Mathematiker den Stellen, an denen algebraische Kurven nicht ganz wohlgerundet sind, den »Singularitäten«, besondere Aufmerksamkeit widmen: Eckig sind sie »ihrer Natur nach« eigentlich nicht, Polyeder wie insbesondere die platonischen Körper dagegen sehr. Es bedarf daher besonderer Anstrengungen, eine algebraische Fläche so zurechtzubiegen, dass sie das Kantenmodell eines Polyeders wiedergibt. Nur die Tatsache, dass die Symmetrien der platonischen Körper sich algebraisch elegant ausdrücken lassen, erleichtert die Arbeit. Gerhard Brunthaler hat es geschafft und seine Kunstfertigkeit dazu eingesetzt, das bekannte Modell, mit dem Johannes Kepler die Radien der Planetenbahnen zu erklären versuchte, nachzuempfinden (Bild links oben).

Eine einzelne Fläche ist definiert durch ein Polynom, also einen Ausdruck wie $(2x^2+y^2+z^2-1)^3-0{,}1x^2z^3-y^2z^3$, in dem die Variablen x, y und z durch endlich viele Additionen und Multiplikationen miteinander und mit Konstanten verknüpft werden. Die Nullstellen des Polynoms, das heißt die Punkte (x, y, z), in denen dieser Ausdruck zu null wird, bilden die Fläche. Multipliziert man dieses Polynom mit einem weiteren, zum Beispiel $(2y^2+x^2+z^2-1)^3-0{,}1y^2z^3-x^2z^3$, dann sind die Nullstellen des Produkts die Nullstellen beider Polynome zusammen. Man kann also algebraische Flächen durch schlichtes Multiplizieren ihrer Polynome zusammensetzen. So hat Hermann Bauer aus Riegelsberg aus einem Herzen zwei gemacht (Bild unten). Die zweite Formel entsteht aus der ersten durch Vertauschung von x und y; entsprechend ist das zweite Herz das Spiegelbild des ersten an der Ebene $x=y$.

Aber das ist nur der einfache Spezialfall. Im Allgemeinen wirkt sich jede kleine Änderung – eine Konstante ein bisschen variieren, hier einen Term hinzufü-



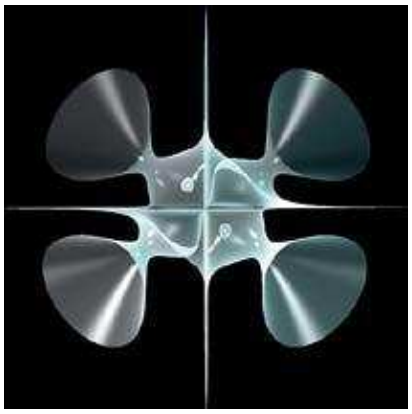
»Zwei Herzen vereint« von Hermann Bauer

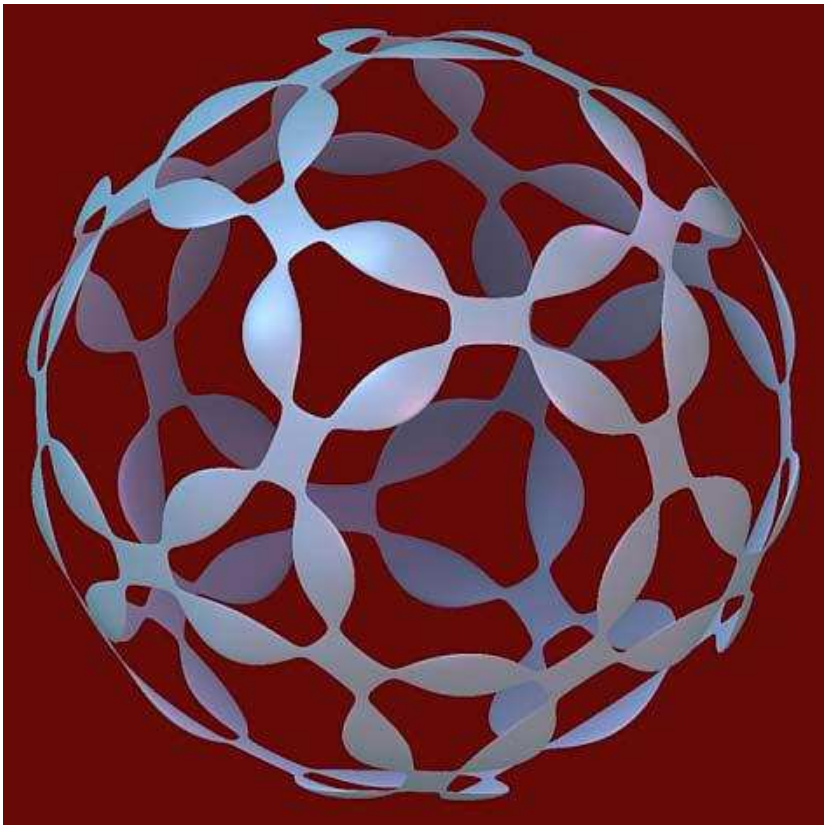
HERMANN BAUER

BIANCA VIOLET

HILTRUD HEINRICH

BEIDE: HILTRUD HEINRICH





MARTIN HEIDER

Die Sieger-Arbeiten des Wettbewerbs: »Tropen-Wunder« von Hiltrud Heinrich (links oben) erhielt in der Endausscheidung die höchste Punktzahl, dicht gefolgt von den Werken »Zuneigung« und »Glockenstern« derselben Autorin (oben). Der zweite Preis geht an Bianca Violet für das Video »Kleeblatt-Metamorphose« (unten eine Folge von Einzelbildern) und der dritte an Martin Heider für »Ikosidodekaeder, filigran gearbeitet« (links).

Die produktivsten Wettbewerbsteilnehmer

Eduard Baumann (65), Physiker aus dem Dorf Le Mouret bei Fribourg (Schweiz), ist in dieser Zeitschrift erstmals aufgetreten als Erfinder der materialsparendsten Verpackungen für Hamburger oder, was auf dasselbe hinausläuft, der Kissen maximalen Volumens (Spektrum der Wissenschaft 6/1995, S. 10). Seine umfangreichen Untersuchungen über Zylinderschnitte habe ich in einem Online-Artikel beschrieben. Die algebraischen Flächen sind eines seiner vielen Geometrie-Hobbys, die er neben zahlreichen Sportarten betreibt.

Gerhard Brunthaler (51), Dozent am Institut für Halbleiterphysik der Johannes-Kepler-Universität in Linz (Donau), geriet an die mathematische Visualisierung über die Symmetrien, mit denen er sich in seiner Vorlesung »Gruppentheorie in der Festkörperphysik« zu befassen hatte. Konsequenterweise brachte er auch in seinen Arbeiten mit algebraischen Flächen immer wieder räumliche Symmetrien ins Spiel.

Martin Heider (45) studierte zunächst Maschinenbau sowie Luft- und Raumfahrttechnik, bevor er zur evangelischen Theologie wechselte. Heute ist er Pfarrer in Iserlohn; Mathematik betreibt er nur noch freizeitmäßig an speziellen Fragestellungen. Weniger als den künstlerischen Aspekt interessiert ihn die Visualisierung mathematischer Strukturen. So suchte er lange und schließlich erfolgreich nach einer Quintik (Fläche fünften Grades), die wie die bereits bekannte Togliatti-Quintik 31 Singularitäten aufweist, aber etwas klarer strukturiert ist.

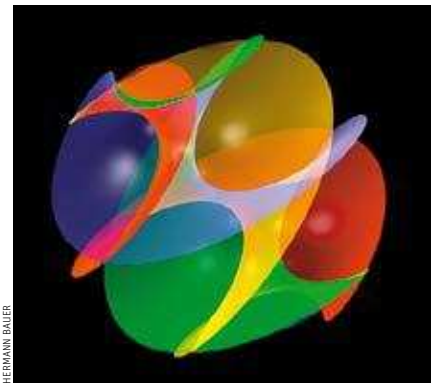
Hiltrud Heinrich (67) aus Darmstadt, Lehrerin für Biologie und Chemie im Ruhestand, versteht nach eigener Aussage »an sich wenig von Mathematik«. Aber die Arbeit mit dem Programm hat sie begeistert, und ausgerechnet die merkwürdige Gleichung, die eigentlich nur 0 = 0 sagt und trotzdem eine solche Fülle an Bildern produziert, macht sie »süchtig«. Ein Bild von ihr (»Aufbruch«) hat auch schon den vorhergehenden Wettbewerb von »Zeit online« gewonnen.

Torolf Sauermann (46) aus Hannover setzt sich hauptberuflich mit Vermessungstechnik sowie Rekonstruktionen und Flächenrückführungen auseinander. Schon vor dem Programm »Surfer« hat er beeindruckende dreidimensionale (visualisierte oder echte) mathematische Kunstwerke produziert.

Bianca Violet (33) schreibt an der TU Berlin ihre Diplomarbeit über »Immersionen der reellen projektiven Ebene in den dreidimensionalen euklidischen Raum«. Da trifft es sich günstig, dass etliche dieser Immersionen, zum Beispiel die Boy-Fläche und Jakob Steiners Römerfläche, sich als algebraische Flächen darstellen lassen. Auf der Suche nach einer algebraischen Darstellung eines Möbiusbandes stolperte sie über die Formel für die kleinsche Flasche, die sie zu weiteren Bildern anregte. Nach solch umfangreichen Vorarbeiten fiel es ihr nicht schwer, die Fußball-Europameisterschaft durch algebraische Spielereien mit den Landesflaggen zu begleiten. Für ihre Videos trifft es sich günstig, dass sie das Filmemachen zu ihrem Beruf machen will.

gen, da einen wegnehmen – auf alle Punkte der Fläche aus. Da hatte Gerhard Brunthaler Mühe, seinen Würfel durch kleine Vertiefungen zu einem Spielwürfel zu machen, weil die Terme für die eine Vertiefung die andere beeinflussten.

Eine andere Eigenschaft, die algebraischen Flächen überhaupt nicht liegt, ist Periodizität. Spiralen- oder schraubenförmige Flächen, die sich unendlich oft wiederholen, sind durch Polynome nicht darstellbar. Warum? Nehmen wir an, wir hätten eine solche Fläche. Dann könnten wir eine Gerade hineinlegen, welche die Fläche in immer gleichen Abständen durchstößt. Unser Polynom, nur auf dieser Geraden betrachtet, wäre damit ein Polynom in einer einzigen Variablen (welche die Gerade entlangläuft) mit unendlich vielen Nullstellen. Dann aber wäre es schon gleich null.



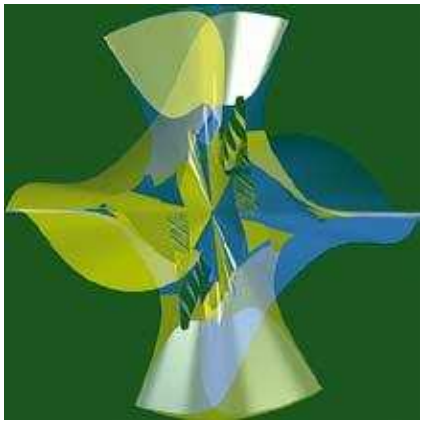
HERMANN BAUER

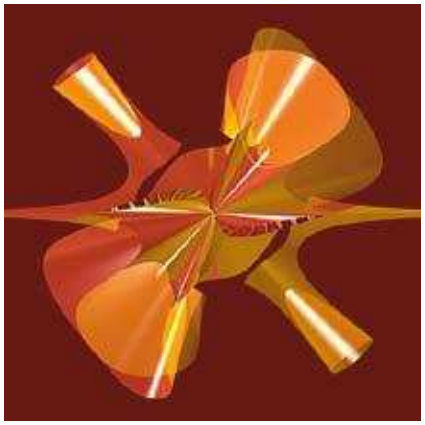
»Rechts- vereinigt mit linksdrehender Spiralfläche (Version I)« von Hermann Bauer. Die Formel besteht aus den beiden Faktoren $x(1-z^2/2+z^4/4!-z^6/6!\ \ldots\ -z^{14}/14!)$ $\pm\, y(z-z^3/3!+z^5/5!\ \ldots\ -z^{15}/15!)$ (man wähle einmal das Plus- und einmal das Minuszeichen).

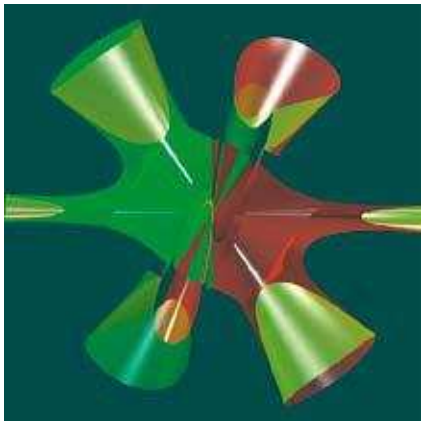
Abhilfe schafft die aus der Analysis bekannte Taylorreihe. Man kann die Sinusfunktion mit ihren unendlich vielen Nullstellen zwar nicht durch ein Polynom darstellen, aber durch ein Polynom annähern. Das ist dann in einem begrenzten Bereich von der echten Sinusfunktion praktisch nicht zu unterscheiden; also beschränkt man die Darstellung auf diesen Bereich (Bild links).

Kunstvolle Rundungsfehler

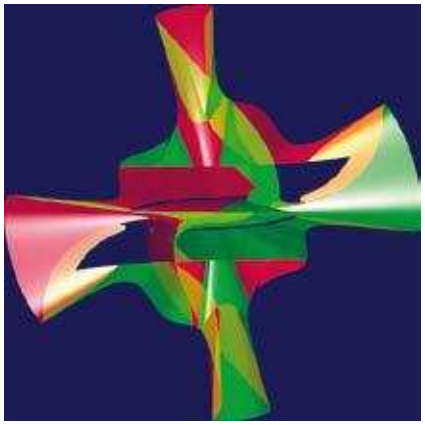
Eine schier unerschöpfliche Quelle von Bildern ist eine Formel, die rein mathematisch gesehen völlig langweilig und unergiebig ist: $xy\cdot yz\cdot xz-x^2y^2z^2$. Wenn man das ausrechnet, kommt 0 heraus. Also beschreibt die Formel die Punkte, für die 0 = 0 gilt. Aber das sind alle Punkte des Raums, und demnach sollte das Programm »Surfer« allenfalls eine dicke schwarze Kugel produzieren (»Sur-

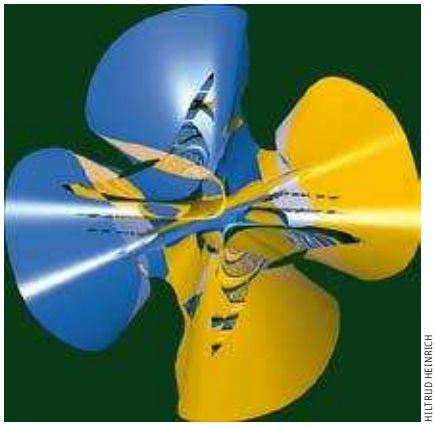






»Unmögliche Figuren« von Hiltrud Heinrich



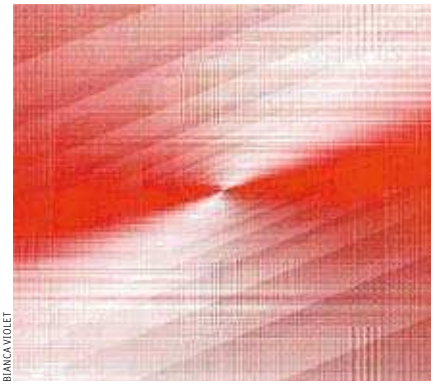


HILTRUD HEINRICH

fer« zeigt vom ganzen Raum ohnehin nur das, was in einer Kugel um den Nullpunkt enthalten ist). Statt dessen findet Hiltrud Heinrich eine erstaunliche Vielfalt an »unmöglichen Figuren« (Bilder oben und rechts).

Was ist da passiert? Das, was man beim Rechnen mit gerundeten reellen Zahlen (»Gleitkommazahlen«) stets fürchten muss: Rundungsfehler. Der Benutzer darf außer der Formel noch die Perspektive wählen. Für ihn liegt also das »Dreibein« aus den drei sich rechtwinklig kreuzenden Koordinatenachsen irgendwie schräg im Raum. Da das für die Visualisierung ungeeignet ist, rechnet »Surfer« die Koordinaten x, y und z in neue Koordinaten u, v und w um, die parallel zu den Bildkanten beziehungsweise senkrecht zur Bildebene verlaufen. Die Umrechnungsfaktoren werden nur mit einer begrenzten Anzahl von Dezimalstellen berechnet. Deswegen arbeitet das Programm nicht mit $0=0$, sondern mit $8{,}673617\cdot 10^{-19}z^6+1{,}387779\cdot 10^{-17}yz^5 -2{,}428613\cdot 10^{-17}x^2z^4+2{,}775558\cdot 10^{-17}xyz^4 -8{,}326673\cdot 10^{-17}x^2yz^3+\ \ldots$ (19 weitere Terme dieser Bauart) $=0$. (Henning Meyer von der Technischen Universität Kaiserslautern hat das für die Formel von Hiltrud Heinrich am Beispiel einer speziellen Perspektive durchgerechnet.) Das ist die Formel einer algebraischen Fläche! Und wenn man die ganze Gleichung mit, sagen wir, 10^{17} multipliziert, was an der Fläche überhaupt nichts ändert, sieht sie sogar einigermaßen normal aus. Aber jede kleine Änderung der Perspektive ergibt eine neue Koordinatenumrechnung, neue Rundungsfehler und damit ein völlig neues Bild.

»xx« von Bianca Violet. Die Formel $x=0$ ergibt eigentlich eine Ebene, aber mit spezieller Setzung der Programmparameter sieht sie merkwürdig gebürstet aus.



BIANCA VIOLET

Es gibt weitere Möglichkeiten, das Programm zu narren. Schließlich muss es innerhalb der Darstellungskugel die Nullstellen des Polynoms finden. Da ist es keine gute Idee, ein Gitter über den Bereich zu legen und in jedem Gitterpunkt nachzusehen, ob der Funktionswert dort gleich null ist. Erstens wären es viel zu viele Punkte, und zweitens liegt eine Nullstelle praktisch nie auf einem Gitterpunkt. Also muss das Programm Paare von Gitterpunkten auswählen, zwischen denen es nach Nullstellen sucht. Dabei muss es gewisse Kriterien anwenden, und in Extremfällen führt das zu bizarren Ergebnissen (Bild links unten).

Die dreiköpfige Jury hat in einem mehrstufigen, streng demokratischen und naturgemäß nicht objektiven Prozess die Gewinner des Wettbewerbs gekürt. Es erstaunt nicht, dass alle drei unter den produktivsten Einsendern (Kasten S. 96) zu finden sind. Da hat sich langes, intensives Experimentieren ausgezahlt.

Wir gratulieren den Gewinnern – und freuen uns ankündigen zu dürfen, dass der Wettbewerb eine Fortsetzung finden wird. Den Stab, den wir von der »Zeit« übernommen haben, reichen wir weiter an die Kasseler Sparkasse, die ab dem 29. Juli einen Wettbewerb nach gleichem Muster veranstaltet. ◁

Christoph Pöppe ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/960485.

Jogurt-Brennstoffzellen und das EKG-Gerät für den Dschungel

Hier folgen weitere Arbeiten aus dem Bundeswettbewerb »Jugend forscht«, der in diesem Jahr in der Stadthalle Bremerhaven ausgetragen wurde.

Von Josephina Maier

TITAN-BIOMATERIALIEN

Alexandra Mannig (18) aus Rudolstadt (Thüringen) hatte sich die Aufgabe gestellt, die Oberfläche von Titanwerkstoffen chemisch so umzugestalten, dass der menschliche Körper den Fremdstoff besser akzeptiert. »Titan ist ein beliebtes Material für Prothesen und Implantate, weil es mechanisch belastbar ist und keine Immunreaktion hervorruft«, erklärt Alexandra. »Für den Einsatz in der Medizin sollte es aber noch mehr können, nämlich mit dem umliegenden Gewebe in Wechselwirkung treten.«

Das wollte sie erreichen, indem sie das Titan mit einem Silan beschichtete. Diese Verbindungen mit einem Grundgerüst aus Silizium und Wasserstoff, bei dem das Silizium dieselben Plätze einnimmt wie bei den einfachen Kohlenwasserstoffen (Alkanen) der Kohlenstoff, gelten als besonders verträglich für das menschliche Immunsystem.

Auf eine Reihe von Glasplättchen dampfte sie zunächst eine Schicht Titan auf, um die Werkstoffoberfläche zu simulieren, und versah diese mit einer dünnen Lage Silan. Die fertigen Präparate testete die Jungforscherin in Kulturschalen mit Bindegewebs- und Knochenzellen. Beide Zelltypen vermehren sich nur, wenn sie sich an eine geeignete Oberfläche anlagern können, und kommen im Körper oft mit Implantaten in Kontakt.

Für die Auswertung färbte Alexandra die Verbindungsproteine an, mit deren Hilfe die Zellen sich in Oberflächen verankern, und gewann damit ein Maß für deren Aktivität. Obendrein zählte sie mit einem elektronischen Zellzähler aus, wie viele der Zellen sich erfolgreich an das beschichtete Titan binden konnten.

Das zwiespältige Ergebnis: Knochenzellen in Testkultur akzeptierten die modifizierten Oberflächen noch schlechter als das blanke Titan. Bindegewebszellen dagegen gediehen auf einer der beiden Silanbeschichtungen, dem Aminopropyltrimethoxysilan (APTMS), deutlich besser.

»Das ist natürlich Grundlagenforschung«, räumt Alexandra ein. Immerhin gibt es eine denkbare Anwendung: »Bei Patienten mit Speiseröhrenkrebs kommen Titan-Stützimplantate mit Bindegewebszellen in Kontakt. Da könnte meine Beschichtung eine Verbesserung bringen.« Ihre Arbeit wurde mit dem 3. Preis im Fach Biologie und dem Biotechnologie-Preis des Fonds der Chemischen Industrie gewürdigt.

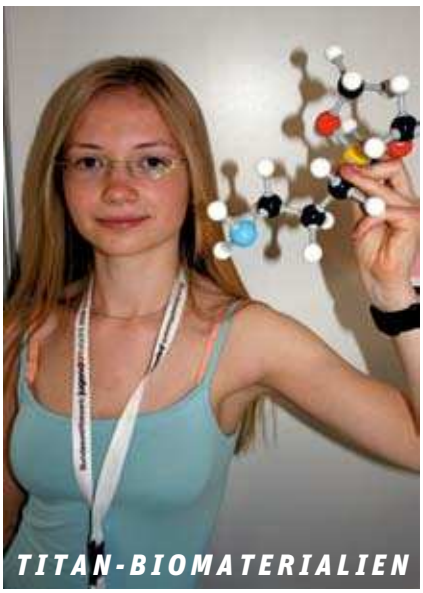
EINFACH-EKG

Als Felix Adamczyk (21) aus Greding (Mittelfranken) von dem Projekt »One Laptop per Child« hörte, das Kinder in Entwicklungsländern mit robusten und billigen Computern ausstattet, fragte er sich, »weshalb es keine vergleichbaren Ansätze in der Medizintechnik gibt«. Kurzerhand besorgte er sich ein Praktikum in Tansania und hörte sich bei »Ärzte ohne Grenzen« um. Dabei kam heraus, dass die vorhandenen EKG-Geräte zu teuer, zu empfindlich und zu schwierig zu bedienen sind. Mit seinem Partner Benedikt Seidl (20) aus dem Nachbarstädtchen Thalmässing machte er sich daran, ein billiges, robustes Gerät zu konstruieren, mit dem auch eine unqualifizierte Hilfskraft zurechtkommt.

Das Gemeinschaftswerk der beiden hat nicht mehr als 200 Euro an Material gekostet. Ein Solarmodul auf dem Deckel des grauen Kastens liefert bei Sonnenschein den Strom und lädt in den Pausen den integrierten Blei-Akku auf. Damit ist das Gerät unabhängig vom Stromnetz – wichtig für den Einsatz in abgelegenen Gegenden oder unter Katastrophenbedingungen. Eine vorhandene externe Stromquelle kann es gleichwohl nutzen.

Um die Herzströme zu messen, benötigen Felix und Benedikt nur fünf mit

ALLE FOTOS DIESES ARTIKELS: JOSEPHINA MAIER



Benedikt Seidl (stehend) und Felix Adamczyk führen ihr dschungelgeeignetes EKG-Gerät vor; Alexandra Mannig zeigt ein Stäbchenmodell des gewebeverträglichen Silans.

buntem Plastik ummantelte Elektroden und eine Flasche mit Alkoholspray, um den Kontakt zur Haut herzustellen. Das Display, auf dem die Herzkurve angezeigt wird, ist auch im Freien gut lesbar und unempfindlich gegen Hitze und UV-Strahlen. Der eingebaute Drucker verwendet dasselbe Thermopapier wie jede Supermarktkasse. Die Herzkurve lässt sich trotzdem noch gut erkennen, wie sich die Jungforscher von einem Kardiologen bestätigen ließen. Das Standardpapier ist in jedem Land der Welt erhältlich – und damit überall, wo das Solar-EKG einmal zum Einsatz kommen könnte.

Für diese Arbeit gab es den 5. Preis im Fachgebiet Technik und den Preis des Bundesumweltministers.

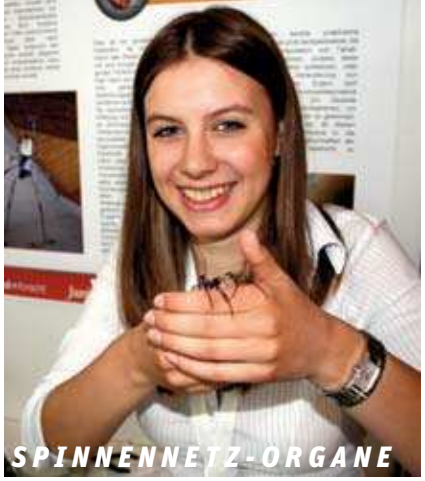
ORGANE AUS DEM SPINNENNETZ

Der heimliche Star am Stand von Janina Otto (17) und Gesine Scharf (18) aus Garbsen (Niedersachsen) ist die Spinne Thekla. Sie gehört zur amerikanischen Art *Nephila clavipes* und lieferte den beiden Jungforscherinnen die Spinnenseide für ihre Versuche. Da störte es wenig, dass Thekla kannibalisch veranlagt ist.

Die beiden untersuchten, ob der Sicherheitsfaden der Spinne, der aus reinen Proteinen besteht, als Gerüst für künstlich gezüchtete Organe taugt. »Um Zellkulturen in eine dreidimensionale Form zu bringen, muss man ihnen eine Struktur vorgeben«, erklärt Janina. »Dieses Gerüst muss mit, wenn das Organ in den Körper transplantiert wird – es lässt sich nicht mehr entfernen, ohne das Gewebe zu zerstören.« Das Problem bereitet Medizinern großes Kopfzerbrechen. Der Empfänger würde ein Organ, das aus seinen eigenen Zellen gezüchtet wurde, zwar nicht abstoßen. Das nützt aber nichts, wenn der Körper das Gerüst nicht annimmt.

Daher ist Spinnenseide ein ideales Material. Der menschliche Körper akzeptiert den Proteinfaden ohne Immunreaktion; darüber hinaus wirkt die Seide antiseptisch, könnte also sogar ein frisch transplantiertes Organ vor einer Entzündung bewahren.

Es galt daher nachzuweisen, dass sich Zellen in einer Zuchtkultur auch an die Struktur der Spinnenseide anpassen können. Aus 20-fach gezwirbeltem Spinnenfaden formten Gesine und Janina in einem Nährmedium das Wort »Zelle« und ließen auf diesem einfachen Gerüst



Thekla, die Seide liefernde Spinne, auf der Hand ihrer Betreuerin Janina Otto; Alexej Grjasnow (rechts) und Sebastian Spohner betreiben ihren Propeller mit Strom aus der Jogurt-Brennstoffzelle.

Bindegewebszellen von Mäusen wachsen. Durch eine Anfärbung der Zellen mit einem fluoreszierenden Stoff gelang den Mädchen der Beweis, dass sich die Bindegewebskultur nach der Struktur des Gerüsts gerichtet hatte: Unter dem Fluoreszenzmikroskop erschien deutlich lesbar das Wort »Zelle«.

Für die Massenproduktion eignet die Methode sich nicht; dafür gestaltet sich die Gewinnung der Seide zu kompliziert. Die Mädchen fixierten die Spinnen mit einer Mullbinde und zogen ihnen den Sicherheitsfaden vorsichtig Meter für Meter aus dem Hinterleib. »Das langfristige Ziel muss sein, die Spinnenseide synthetisch herzustellen«, sagt Gesine. In dem Labor, mit dem die beiden kooperiert haben, wird schon daran geforscht.

JOGURT-BRENNSTOFFZELLE

Sebastian Spohner (20) und Alexej Grjasnow (19) aus Frankfurt am Main sind in der Forschung an Bio-Brennstoffzellen schon alte Hasen. Statt Wasserstoff und Sauerstoff von außen zuzuführen, setzten die Jungforscher vor vier Jahren menschliche Darmbakterien in ein Nährmedium und ließen sich von den Mikroorganismen den Brennstoff für ihre Zelle liefern. Bereits damals konnten sie mit ihrer Konstruktion einen kleinen Propeller betreiben – »oder eine Glühbirne«, sagt Sebastian, »aber das finden die Leute nicht so beeindruckend«.

Damit wussten die Jungforscher aber noch nicht, welches Stoffwechselprodukt der Darmbakterien die Energie lieferte. In der Literatur stießen sie auf die Vermutung, dass es wie in der klassischen Brennstoffzelle molekularer Wasserstoff sein könnte. »Wir haben bewiesen, dass das in unserer Brennstoffzelle nicht der Fall ist«, sagt Alexej. Einfach war das nicht, immerhin verfügt das Darmbakterium *Escherichia coli* über komplexe Stoffwechselwege, kann mit oder ohne Sauerstoff leben und produziert je nach Situation eine ganze Reihe potenzieller Brennstoffe.

Um herauszufinden, welcher von ihnen wirksam war, gaben Alexej und Sebastian die in Frage kommenden Stoffwechselprodukte getrennt voneinander in die Brennstoffzelle. Wenn eines davon der gesuchte Stromlieferant war, musste er die Zelle auch allein betreiben können. Zwei Kandidaten blieben übrig. Die Jungforscher verglichen die Konzentration der beiden Chemikalien vor und nach dem Betrieb des Propellers – und stellten fest, dass Laktat verbraucht worden war, eine abgewandelte Form der Milchsäure.

»Als wir wussten, dass unsere Bio-Brennstoffzelle mit Laktat läuft, haben wir eine neue gebaut«, sagt Sebastian. »Dieses Mal aber nicht mit Darmbakterien, sondern mit *Lactobacillus casei*, der fast nur Laktat produziert.« Diese Bakterien sind aus der Jogurtwerbung bekannt, und wirklich lässt sich die neue Brennstoffzelle von Sebastian und Alexej mit einfacher Molke und Jogurtkulturen betreiben. An ihrem Stand haben die beiden wieder den Propeller in Betrieb, aber auch einen CD-Spieler. Die reine Laktat-Zelle liefert nämlich siebenmal so viel Strom wie die alte Bio-Brennstoffzelle mit Darmbakterien.

Für diese Errungenschaft gab es einen 4. Preis im Fach Chemie und einen Preis des Fonds der Chemischen Industrie. ◁

Josephina Maier ist freie Journalistin in Darmstadt.

AUTORIN

PHILOSOPHIE

Schweres leicht gedacht

Richard David Prechts Rundgang durch die Philosophie ist wie eine interessante und anregende Abendunterhaltung.

Richard David Precht hat es tatsächlich fertiggebracht, den Bericht des Komikers Hape Kerkeling über einen Pilgergang nach Santiago de Compostela vom jahrelang besetzten Platz 1 der »Spiegel«-Sachbuch-Beststellerliste zu verdrängen – mit einem Buch über Philosophie! Das kann nichts Rechtes sein, dachte ich, griff misstrauisch nach dem handlichen Paperback und rüstete mich zum Verriss nach dem Motto: Gewogen und zu leicht befunden. Leicht fiel mir das Lesen in der Tat, aber oberflächlich schreibt Precht nicht.

Er hat Philosophie studiert, über den Schriftsteller Robert Musil promoviert, sympathische Romane geschrieben und auch sonst fleißig publiziert. Sein neues Buch gliedert er nach den von Immanuel Kant formulierten Grundfragen der Philosophie: Was kann ich wissen? Was soll ich tun? Was darf ich hoffen? Es beginnt wie eine Erzählung mit einem persönlichen Bekenntnis: Die Schriften der Philosophen haben den Studenten Precht fasziniert und die Professoren ihn enttäuscht, denn sie rekapitulierten die Schriften nur, ohne von neuen Erkenntnissen insbesondere der Hirnforschung Notiz zu nehmen, die gleich nebenan gelehrt wurden.

Der persönliche Einstieg wirkt entwaffnend, denn einem Bekenntnis kann man schlecht widersprechen. Gern nahm ich nun teil an der unvoreingenommenen, respektlosen, aber ernsthaften Wahrheitssuche eines Zeitgenossen. Was weiß die moderne Neurobiologie über unser Denken zu sagen, über Moral und Willensfreiheit? Ist Abtreibung moralisch? Soll man Sterbehilfe erlauben? Dürfen wir Tiere essen? Haben Menschenaffen Menschenrechte? Darf man Menschen klonen?

Deutlich spürt der Leser: Precht behandelt all diese Fragen, weil er selbst Antworten haben will; das merkt man daran, wie er wissbegierig die unterschiedlichen philosophischen Positionen prüft und übersichtlich präsentiert. Für jedes Kapitel findet er einen überraschenden, unterhaltsamen Einstieg; nicht nur Fans von »Raumschiff Enterprise« und »Matrix« kommen auf ihre Kosten.

Erstaunlich selten unterläuft Precht ein Beiwort, das er besser weggelassen hätte, wenn er keine Lust hatte, es näher auszuführen – »der bemerkenswerte evangelische Pfarrer Dietrich Bonhoeffer« oder »Martin Heidegger, der eine berüchtigte Figur war«. An solchen Stellen merkt man, dass Precht sein Riesenthema beschneiden musste wie Charlie Chaplin, der als Tramp alles, was aus seinem prallen Koffer quillt, mit der Schere stutzt.

Trotzdem, für die im Untertitel angekündigte »philosophische Reise« ist man mit Prechts Koffer gut gerüstet. Auch kleine Perlen sind drin. Im Kapitel »Was ist ein glückliches Leben?« berichtet er vom Widerspruch zwischen dem persönlichen Wertesystem, das in unserer auf Sicherheit und Besitz ausgerichteten Gesellschaft Geld und Prestige obenan stellt, und dem empirischen Befund der Glücksökonomen, wonach nichts glücklicher macht als sozialer Reichtum, also Beziehungen zu anderen Menschen. So gesehen, folgert Precht, leben die meisten Menschen im – global gesehen reichen – Westen falsch: Sie »kaufen Dinge, die sie nicht brauchen, um Leute zu beeindrucken, die sie nicht mögen, mit Geld, das sie nicht haben«.

Ein Buch über Philosophie, das man gut gelaunt zuklappt wie nach einem Abend mit vielseitig interessierten und darum interessanten Gästen.

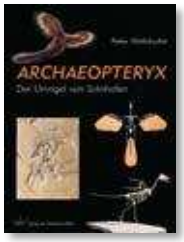
Michael Springer

Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Richard David Precht
Wer bin ich – und wenn ja, wie viele?
Eine philosophische Reise
Goldmann, München 2007.
400 Seiten, € 14,95

PALÄONTOLOGIE

Der größte Star unter den Urtieren ist ein Vogel



Peter Wellnhofer hat die Summe seines Lebenswerks über den *Archaeopteryx* in einem Prachtband zusammengefasst.

Dem einen ist er das Missing Link zur Untermauerung der darwinschen Abstammungslehre, dem anderen ein befiederter Dinosaurier, und einige wenige hielten ihn anfangs sogar für eine Fälschung: *Archaeopteryx*, das wohl berühmteste aller Fossilien, ist mit 150 Millionen Jahren der älteste Vogel überhaupt und bis heute weltweit nur aus Gesteinen der Gegend um Solnhofen (Bayern) bekannt. Ein großformatiges, reich bebildertes und wunderbar geschriebenes Buch widmet sich nun ausschließlich dieser Ikone der Wirbeltierpaläontologie.

Peter Wellnhofer, ehemaliger Hauptkonservator an der Bayerischen Staatssammlung für Paläontologie und Geologie in München, war dienstlich für dieses bayerische Kulturgut verantwortlich. Seit mehr als 30 Jahren hat er aber auch seine Amtspflicht zur persönlichen Leidenschaft gemacht und kann daher gleichermaßen wissenschaftlich aus dem Vollen schöpfen wie aus dem Nähkästchen plaudern. Beides tut er in seinem neuen Werk ausgiebig, gut verständlich und unterhaltsam. Von den zehn bekannten *Archaeopteryx*-Skeletten, die im Verlauf der letzten rund 150 Jahre entdeckt wurden, hat Wellnhofer drei Exemplare selbst erstmals wissenschaftlich bearbeitet. Persönlich studiert hat er natürlich alle und mehr als 25 Fach- und Populärartikel hierzu verfasst, was ihn als den Spezialisten mit der wohl weltweit größten Erfahrung ausweist.

Es war das Ziel des Autors, sämtliche Informationen aus Hunderten von meist englischsprachigen, oft hochwissenschaftlichen Einzelpublikationen zusammenzutragen und für ein breites Publikum aufzubereiten. Das ist ihm mit Bravur gelungen.

Der weniger vorinformierte Leser wird mit gut verständlichen Kapiteln zur Fundregion, den geologischen Fundschichten der Solnhofener Plattenkalke und deren Fossilien anschaulich in die Thematik eingeführt. Die folgenden mehr als 100 Seiten widmen sich ausgiebig den einzelnen *Archaeopteryx*-Funden. Wellnhofer weiß zu jedem der zehn Skelette sowie zu der fossilen

Das zehnte *Archaeopteryx*-Exemplar (»Thermopolis-Exemplar«) hat einen hervorragend erhaltenen Schädel, wie diese Ultraviolettaufnahme mit fluoreszierender Knochensubstanz zeigt.

Einzelfeder eine eigene Geschichte zu erzählen, unterhaltsam und mit Liebe zum Detail. Anekdoten zur Entdeckung und zu den Verkaufsverhandlungen, Berichte von Zeitzeugen, Zitate aus unpublizierten Archivunterlagen sowie persönliche Erlebnisse des Autors bereichern jedes der Kapitel.

Die ausführlichen anatomischen Beschreibungen genügen höchsten wissenschaftlichen Ansprüchen. Für einen anatomisch nicht vorgebildeten Leser mögen sie zuweilen zu detailliert sein, erheben aber dadurch das Buch zu einem Nachschlagewerk auch für Fachspezialisten. Zum Ausgleich ist das gesamte Werk umfangreich und prächtig bebildert. Alle zehn Exemplare und das Einzelfeder-Fossil sind großformatig und farbig abgebildet; hinzu kommen Bilder der Steinbrüche, der Finder, der früheren Privatbesitzer, historische Abbildungen, Röntgen- und UV-Aufnahmen der Fossilien (Bild oben) sowie anatomische Detailzeichnungen des Autors. Zahlreiche der Bilder werden hier erstmals publiziert.

Wie sah das lebende Tier *Archaeopteryx* aus? Wie funktionierte sein Organismus? Wie gut konnte er fliegen? All diesen und weiteren Fragen widmet sich ein ausführliches Kapitel, in dem sämtliche alten und neuen Theorien und Ideen erläutert werden. Abgerundet wird das Buch mit interessanten und verständlich aufbereiteten Artikeln zum Ursprung und der frühen Evolution der Vögel und zur Entstehung des Vogelflugs sowie der Federn. *Archaeopteryx* hat zu diesen Fragen etliches beizutragen.

Dieses Werk, das an Vollständigkeit und Professionalität kaum zu überbieten ist, das durch die klare und schöne Sprache des Autors besticht und dessen Preis durch die hohe Qualität des Buches gerechtfertigt ist, ist ein »Muss« für jeden – vom Laien bis zum Spezialisten –, der sich für Fossilien, Paläontologie, Evolutionsbiologie oder einfach den *Archaeopteryx* interessiert. Bleibt zu hoffen, dass es bald eine englische Version geben wird, so dass dieses Meisterwerk weltweit gebührende Beachtung findet.

Ursula Göhlich

Die Rezensentin ist promovierte Paläontologin und Kuratorin für Wirbeltierpaläontologie am Naturhistorischen Museum Wien. Sie beschäftigt sich mit fossilen Rüsseltieren und Vögeln aus dem Tertiär sowie mit kleinen jurassischen Raubdinosauriern.

Peter Wellnhofer
Archaeopteryx
Der Urvogel von Solnhofen

Friedrich Pfeil, München 2008.
256 Seiten, € 78,–

HIRNFORSCHUNG

Das Gehirn im Doppelpack

Zwei gleichnamige Werke über ein heißes Thema der Forschung: Hans Günter Gassen hat unklare Vorstellungen über die Zielgruppe, Norbert Herschkowitz bietet dagegen einen kompakten Überblick.

Bis hinein in das Feuilleton reden sich Wissenschaftler und Philosophen über Themen wie Willensfreiheit und Neurotheologie die Köpfe heiß. Da besteht zweifellos Bedarf an einem Buch, das die Hirnforschung auch für Leser ohne Vorwissen verständlich darstellt. Genau das wollen sowohl Hans Günter Gassen als auch Norbert Herschkowitz leisten.

Das Werk des emeritierten Biochemikers Gassen ist auf den ersten Blick übersichtlich und attraktiv gestaltet. Jede Seite ist großzügig und farbig illustriert, meist in guter Qualität. Viele der Illustrationen sind wissenschaftlichen und medizinischen Lehrbüchern entnommen. Dazu ist der Text mit zahlreichen Tabellen und Diagrammen aufgelockert.

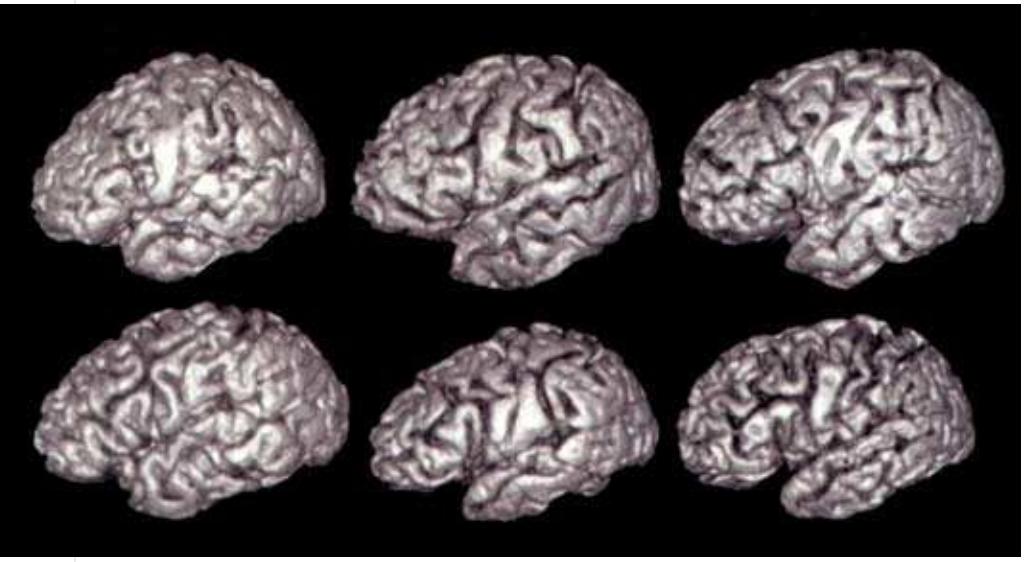
Nach einem Einführungskapitel über die Evolution des Menschen skizziert Gassen die Geschichte der Hirnforschung, klärt über den Aufbau des Gehirns und die Funktionsweise der Neuronen auf. Er zeigt dem Leser die komplizierte Hirnanatomie und macht dabei klar, wie wenig wir bisher über die Funktion einzelner Bereiche wissen. Ein ganzes Kapitel ist den bildgebenden Verfahren gewidmet. Das ist wichtig, wissen doch die wenigsten Menschen, wie die bunten Hirnscans wirklich zu Stande kommen.

Viele Teilbereiche des weiten Feldes Hirnforschung kommen zur Sprache: Grundlagen des Gedächtnisses, hormonelle Belohnungssysteme, Hirnkrankheiten, Reizübertragung in den Neuronen und an den Synapsen sowie Geschichte der Traumdeutung. Dabei behandelt der Autor sowohl anatomische und molekulare als auch psychologische Aspekte.

Weiter geht es mit Randbereichen wie der Funktion der Sinne und der Kopfanatomie. Das Kapitel zur Neurogenetik befasst sich auch mit den Grundlagen der Vererbung und der Frage nach angeborenem oder erlerntem Verhalten. Immer wieder reißt der Autor philosophische Fragen an. Ein Kapitel über das Problem der Willensfreiheit darf natürlich nicht fehlen.

Eine gewisse Konzeptlosigkeit kann Gassen dabei nicht verbergen. Die Auswahl und Reihenfolge der Themen wirkt bisweilen etwas chaotisch, der anfangs noch erkennbare rote Faden geht schnell verloren.

Verschiedene Menschen haben sehr verschiedene Gehirnoberflächen, wie diese Rekonstruktionen von MR-Tomografien zeigen. Aus dem Buch von Hans Günter Gassen



Das größte Manko des Buchs aber ist seine Sprache. Permanent springt der Autor zwischen Plauderton und akademischem Jargon hin und her. Oft ist seine Wortwahl für eine breite Leserschaft zu trocken und zu schwierig. Herausgekommen ist eine sehr sperrige Mischung aus populärwissenschaftlichem Werk und Lehrbuch.

Dazu kommen einige ärgerliche sachliche Fehler. Gassen schreibt etwa, der Begriff »Körper-Seele-Dualität« bezeichne den Glauben an die Unsterblichkeit der Seele. Das ist so nicht richtig. Das berühmte Libet-Experiment verlegt der Autor ins Jahr 1970 – fast zehn Jahre zu früh. Und natürlich zählen Bakterien, anders als im Buch behauptet, sehr wohl zu den Lebewesen.

Den Anspruch des Klappentextes, »auch dem Laien die Geheimnisse unseres Gehirns verständlich zu machen«, kann Gassen nicht einlösen.

Der Neurowissenschaftler und Kinderarzt Norbert Herschkowitz geht an dasselbe Thema – mit demselben Buchtitel – ganz anders heran. Sein schmales Bändchen, in der Reihe »Was stimmt?« erschienen, kann sich an der opulenten Aufmachung von Gassens Buch nicht messen, es kommt eher nüchtern daher.

Herschkowitz erhebt auch gar nicht erst den Anspruch, das gesamte Spektrum der Hirnforschung vorzustellen. Er behandelt populäre Behauptungen über das Gehirn, von »Wir nutzen nur neun Prozent unseres Gehirns« bis »Frauen denken anders als Männer«. Zu diesen nimmt er jeweils einige Seiten lang Stellung und versucht, moderne Mythen von Fakten zu trennen.

Sein Stil ist sachlich, klar und für Laien stets verständlich. Der Autor nimmt auch auf neueste Forschungsergebnisse Bezug. Auf den wenigen Seiten seines Büchleins kann er keine erschöpfende Darstellung unterbringen; aber ein erster Überblick ist ihm gelungen. Herschkowitz schafft es, die wichtigsten Probleme der Hirnforschung fachkundig und kompakt auf den Punkt zu bringen.

Malte Jessl

Der Rezensent ist Diplombiologe und freier Wissenschaftsjournalist in Wiesbaden.

Hans Günter Gassen
Das Gehirn
Primus, Darmstadt 2008. 160 Seiten, € 39,90

Norbert Herschkowitz
Das Gehirn
Was stimmt? Die wichtigsten Antworten
Herder, Freiburg 2007. 128 Seiten, € 7,90

CHEMIE

Chemiereaktor Pflanze

Experimentell und nostalgisch nimmt Georg Schwedt pflanzliche Naturstoffe unter die Lupe.

Wer freut sich nicht, wenn nach einem grauen Winter kahle Äste die ersten Knospen zeigen, Forsythien in strahlend gelber Blütenpracht erscheinen und wohl riechender Veilchenduft die noch taufrische Luft erobert? Für Georg Schwedt bedeutet dies: Nichts wie raus und Pflanzen sammeln. Der Chemiker, der durch seine Bücher über Experimente mit Supermarktprodukten bekannt geworden ist, hat ein Buch über Pflanzenstoffe geschrieben und kehrt damit zu seinen persönlichen Wurzeln zurück: Als Neuntklässler schrieb er in einer Jugendzeitschrift einen Artikel mit dem Titel »Verwehte Blätter … So legt man ein Herbarium an«.

Pflanzen sind chemische Laboratorien par excellence und eignen sich daher hervorragend zur Untersuchung im Reagenzglas. Dem Buch liegen 22 Basisexperimente zu Grunde, die allesamt Nachweisreaktionen für Stoffklassen wie Mineralstoffe, organische Säuren, Kohlenhydrate, Öle, Pflanzenfarbstoffe und Phenolderivate darstellen und sich auf die gesamte Flora anwenden lassen – geschützte Pflanzen natürlich ausgenommen. Schwedt stellt sie exemplarisch an etwa 50 Arten vor, wobei er auf deren Besonderheiten eingeht. Allerdings ordnet er sie nicht nach der botanischen Systematik, sondern schlicht nach den vier Jahreszeiten. Deren jede wird zusätzlich mit einem oder mehreren Gedichten eingeläutet. Zugegeben, im Winter ist ein wenig Improvisation gefragt. Neben Versuchen zu Nadelbäumen, Efeu, Buchsbaum und Grünkohl muss man auf die Gewürzregale im Supermarkt zurückgreifen.

Die Versuche beruhen häufig auf Farb- oder Fällungsreaktionen. Mit letzteren werden Kalzium- und Kaliumionen in einer Lösung der Verbrennungsasche nachgewiesen. Neben den Nachweisen für organische Säureanionen wie Oxalat stellt Schwedt auch einen für Silikate vor, der auf der Bildung eines gelben Molybdatosilikat-Komplexes oder von Molybdänblau beruht. Damit lässt sich Kieselsäure in den rauen (verkieselten) Schachtelhalmen feststellen.

Natürlich denkt man bei Pflanzen sofort an allerhand prächtige Farben. Ihnen ist der größte Teil der Experimente gewidmet. Typisch hierfür sind pflanzliche Säure-Base-Indikatoren. Analog zum klassischen Beispiel des Rotkohlsafts beschreibt Schwedt die Extraktion der Anthocyane aus Klatschmohnblüten und ihren reversiblen Farbumschlag von rot nach gelb-braun bei Erhöhung des pH-Werts.

Auch Flavonoide lassen sich bei unzähligen Pflanzen als Blütenfarbstoff extrahieren, etwa bei den gelben Blüten des Echten Labkrauts. Seinen Namen verdankt es dem Labferment in seinem Blattgewebe, das früher zur Käseherstellung genutzt wurde. Experimentell lässt sich das leicht zeigen, indem man ein paar Tropfen eines Blattextrakts zu Milch gibt, die daraufhin gerinnt. Auch die Wurzeln dieser Pflanze fanden früher in der Färberei Verwendung.

Schwedt hat sein Buch nicht als reines Experimentierbuch gestaltet; vielmehr findet sich zu jeder Pflanze eine Hand voll nützlicher Informationen zu Verbreitung, Nutzung und charakteristischen Eigenschaften. Manchmal zitiert er dabei aus Kräuterbüchern des 15. und 16. Jahrhunderts und Bestimmungsbüchern aus dem frühen 20. Jahrhundert und gibt damit Einblicke in die frühere Bedeutung der jeweiligen Pflanzen. Schwarz-Weiß-Bilder aus den alten Werken oder aus Schwedts Herbarium begleiten den Informationstext. Beides zusammen reicht zum Bestimmen der vorgestellten Pflanzen nicht immer aus. Man sollte daher bei Bedarf zusätzlich ein Bestimmungsbuch zu Rate ziehen, bevor man an Stelle des Echten Johanniskrauts (rote Finger nach Zerreiben der Blüten!) ein »falsches« pflückt.

Auch der chemische Hintergrund kommt nicht zu kurz: Alle für Pflanzen relevanten Naturstoffklassen stellt Schwedt am Anfang des Buchs kurz vor, was einer guten Auffrischung der Kenntnisse dient. Wer allerdings kaum Vorkenntnisse besitzt, wird hier womöglich durch die Aneinanderreihung von Fachausdrücken erschlagen. Passend zu den einzelnen Abschnitten findet sich im Anhang eine sehr übersichtliche Darstellung der Strukturformeln häufig genannter Naturstoffe.

Nahezu alle benötigten Chemikalien sind im Supermarkt oder in der Apotheke preiswert erhältlich. Die Versuche lassen sich auch meist direkt auf der Wiese durchführen.

Für den Biologie- oder Chemieunterricht ist das Buch wegen seiner Vielfalt an verwendetem Pflanzenmaterial und wegen der leicht durchzuführenden, für jede Jahrgangsstufe geeigneten Experimente hervorragend geeignet. Und es regt dazu an, zu hinterfragen, was es eigentlich chemisch heißt, in den sauren Apfel zu beißen.

Kathrin Daub

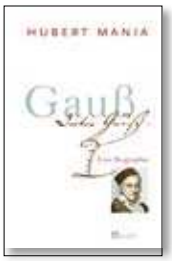
Die Rezensentin studierte Chemie und Biologie auf Gymnasiallehramt und promoviert am Institut für Anorganische Chemie der Universität zu Köln über Selten-Erd-Halogenide.

Georg Schwedt
Chemie für alle Jahreszeiten
Einfache Experimente mit pflanzlichen Naturstoffen
Wiley-VCH, Weinheim 2007.
222 Seiten, € 29,90

BIOGRAFIE

Vom Handwerkersohn zum Fürsten der Mathematiker

Hubert Mania beschreibt lebhaft und detailreich das Leben des Carl Friedrich Gauß – und schweigt weit gehend über sein Werk.



Carl Friedrich Gauß, geboren 1777 in Braunschweig als Sohn eines Lehmmaurers und Hausschlachters, wird schon früh als mathematisches Wunderkind erkannt, erhält als 14-Jähriger ein Stipendium des Herzogs Carl Wilhelm Ferdinand von Braunschweig, verfasst mit Anfang 20 ein Monumentalwerk namens »Disquisitiones arithmeticae«, mit dem er die Zahlentheorie von Grund auf neu erschafft, findet mittels der von ihm erfundenen »Methode der kleinsten Quadrate« einen neu entdeckten und dann verloren gegangenen Kleinplaneten wieder, wird zum Professor und Direktor der Sternwarte in Göttingen berufen, leitet persönlich über Jahre hinweg die Vermessung des Königreichs Hannover mitsamt den zugehörigen Nachberechnungen und erarbeitet ge-

meinsam mit dem Physiker Wilhelm Weber die Grundlagen des Elektromagnetismus. Weltberühmt und hochgeehrt, bekommt er schon bald nach seinem Tod 1855 den ehrenden Beinamen »Princeps mathematicorum« (Fürst der Mathematiker), sein Bild ziert den letzten Zehnmarkschein, und selbst den Hütern der Walhalla ist inzwischen aufgegangen, dass es sich um einen der größten Geister überhaupt handelt. Mindestens 50 mathematische Begriffe, Sätze und Verfahren tragen seinen Namen.

Diese Geschichte des Wissenschaftlers Gauß ist vielfach erzählt und ausschmückend abgeschrieben worden. Auch sein Privatleben ist gut dokumentiert: Zwei Ehefrauen, Johanna Osthoff und Minna Waldeck, muss er zu Grabe tragen. Seine Tochter Therese stirbt mit 32 Jahren an der Schwindsucht. Sein Sohn Eugen macht seinen Eltern – in deren Augen – so viel Schande, dass der Vater ihn bis ans Ende der Welt verstößt, nach Amerika. Da verwundert es nicht, wenn Gauß auf seine alten Tage schwermütig und wortkarg wird.

Wer auf diesem vielfach beackerten Feld noch etwas Neues finden will, muss tiefer graben. Das hat der Braunschweiger Autor und Übersetzer Hubert Mania in der Tat getan. Er macht Gaußens Vorfahren ausfindig und erinnert dabei den Leser daran, dass es noch im 18. Jahrhundert durchaus üblich war, mit weniger als 40 Jahren an »Auszehrung« zu sterben.

Er beschreibt ausführlich die Figur von Gaußens Gönner, dem Herzog Carl Ferdinand: Eigentlich ein Kind der Aufklärung, muss er zur Finanzierung seiner fortschrittlichen Pläne ausgerechnet Landeskinder als Söldner an die Engländer verkaufen, die ihre freiheitsliebenden Kolonisten in Amerika zur Räson bringen wollen.

Aus den umfangreichen Briefwechseln rekonstruiert Mania die Beziehungen seines Helden zu dessen Freunden, vor allem dem 20 Jahre älteren Astronomen Wilhelm Olbers und dem Studienkollegen Wolfgang Bolyai. Er versucht die Gründe des bitteren Zerwürfnisses zwischen Vater und Sohn zu eruieren und findet – nichts. Offensichtlich haben die Beteiligten es vorgezogen, sich nicht schriftlich dazu zu äußern.

Grundsätzliches hat sich durch Manias Bemühungen an dem Bild des großen Mathematikers wohl nicht geändert. Es ist etwas farbiger, detailreicher, befreit von tradierten Übertreibungen und besser in den historischen Kontext eingeordnet.

Und der eigentliche Grund für Gaußens Weltruhm, die Mathematik? In dem Buch kommt sie nur an wenigen Stellen vor, und just dort wird die ansonsten klare und lebhafte Sprache merkwürdig undeutlich und manchmal sogar falsch. Das ist offenbar nicht Manias Stärke.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Hubert Mania
Gauß
Eine Biographie
Rowohlt, Reinbek 2008. 368 Seiten, € 19,90

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Exklusiv für Abonnenten

Ab sofort können Sie sich mit Ihrer Abonnentennummer unter **www.spektrum-plus.de** Ihren persönlichen Spektrum-Mitgliedsausweis herunterladen. Damit erhalten Sie Vergünstigungen bei den aufgelisteten Museen, Filmtheatern und wissenschaftlichen Einrichtungen:

Industriemuseum, Chemnitz / Neanderthal Museum, Mettmann / Auto & Technik Museum, Sinsheim / Technik Museum, Speyer / IMAX 3-D Filmtheater, Sinsheim / IMAX DOME, Speyer / Deutsches Dampflokomotiv-Museum, Neuenmarkt / Deutsches Hygienemuseum, Dresden / Deutsches Technikmuseum, Berlin / Zentrum für Multimedia, FH Kiel / Museum für Naturkunde, Magdeburg / Volkssternwarte und Planetarium, Recklinghausen / Urwelt-Museum Oberfranken, Bayreuth / Universum Science Center, Bremen / Deutsches Erdölmuseum, Wietze / Mathematikum, Gießen / Deutsches Museum, Bonn / Astronomisches Zentrum, Schkeuditz / Planetarium und Schulsternwarte, Herzberg / Planetarium, Freiburg / Turm der Sinne, Nürnberg / Urania, Berlin / Zeppelin-Museum, Meersburg / Nicolaus-Copernicus-Planetarium, Nürnberg / Dynamikum, Science Center, Pirmasens

Schauen Sie doch einfach im Internet, was Sie erwartet!

Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissen aus erster Hand

www.spektrum-plus.de

VORSCHAU

Heft September 2008
ab 26. August im Handel

Die ältesten Sterne des Universums

Astronomen entdecken in der Milchstraße immer mehr Sterne, die fast so alt sind wie der Kosmos. Damit gelingt es ihnen, wichtige Fragen der Kosmologie zu beanworten

NASA/ESA, STSCI, LUIGI BEDIN

WEITERE THEMEN IM SEPTEMBER

PORTRÄT

Genforscher Thomas Tuschl

Der Mann, der die Gene beim Menschen zum Schweigen brachte

Zellaustausch zwischen Mutter und Kind

Eine ungewöhnliche Entdeckung – wohl jeder von uns beherbergt auch Zellen der eigenen Mutter

Labor auf dem Chip

Miniaturlaboratorien sollen schnelle medizinische Tests ermöglichen – für Forschung und Patienten in der Dritten Welt

GEORGE RETSECK

PUBLIC DOMAIN

SERIE: GROSSE RÄTSEL DER MATHEMATIK

Die riemannsche Vermutung

Im Jahr 1859 stellte Bernhard Riemann eine Hypothese auf, die heute als eines der größten Rätsel der Mathematik gilt. An ihrem Beweis sind bisher alle Forscher gescheitert

Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:

www.spektrum.com/newsletter